

ANALYSE AV KLIMAENDRINGENES VIRKNINGER PÅ AVLØPSNETTET I CHARLOTTENLUND OG RANHEIM, TRONDHEIM KOMMUNE - NORGE.

ANALYSIS OF CLIMATE CHANGE IMPACTS ON THE URBAN DRAINAGE SYSTEM
IN CHARLOTTENLUND AND RANHEIM, TRONDHEIM MUNICIPALITY - NORWAY.

MAGNUS OLSEN

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP

INSTITUTT FOR MATEMATISKE REALFAG OG TEKNOLOGI
MASTEROPPGAVE 30 STP, 2011



Forord

Denne masteroppgaven er mitt bidrag til ExFlood-prosjektet og er påvirket av mine fem år ved Universitetet for miljø og bioteknologi (UMB). Jeg har prøvd å benytte meg av kunnskap opparbeidet gjennom mitt studium, og håper at oppgaven bærer litt preg av at jeg har en utdanning blandet med både tekniske og økonomiske fag over alle studienivå.

Problemstillingen til dette arbeidet har vært å kartlegge et gitt avløpsområdes sårbarhet for klimaendring og utbyggingspress. På veien mot dette målet har det blitt gjort en rekke kompromisser, men jeg håper allikevel at deler av dette arbeidet kan være nyttig for å nå de endelige målene i ExFlood-prosjektet.

Først vil jeg takke min hovedveileder Oddvar Lindholm og biveileder Jarle Bjerkholt, som har gitt rom for personlig faglig innfallsvinkel og gode råd som virkelig har vært gode fyrtårn når det trengtes.

Takk til Tomas Eidsmo ved DHI for at de stilte Mike Urban programpakken disponibelt for denne oppgaven og Geir Lindholm, som med Rosims programvare "Rosie", viste meg mye av tankemåten bak VA-design og analyse med programvare som verktøy. Vegard Nilsen ved Norconsult AS og UMB har også bidratt med innspill om tolking av meteorologisk data og hvor fokuset ved oppgaven burde ligge. Hans tidligere masteroppgave har dessuten vært en kilde til inspirasjon.

Videre takk til Brigitte Gisvold Johannessen og Olav Nielsen i Trondheim kommune, som har stilt avløpsmodellen til rådighet og svart på mine spørsmål rundt det arbeidet jeg gjorde med den.

Takk til ExFlood-gruppen som har vært en arena for tverrfaglig samarbeid og viktige ballspillere ved ideutveksling.

Dessuten må jeg takke min venn Odd-Magnus Eng som uforpliktende og tålmodig har muliggjort store deler av MATLAB-skriptene benyttet i denne oppgaven. Uten hans innsats og villighet til å gi meg oppfrisking og fornyet innsikt i MATLAB-miljøet, eller de skriptlinjer skrevet av han, hadde de skriptlinjene jeg selv har skrevet kun vært på planleggingsstadiet enda. Tusen takk.

Ås, 12. mai 2011



Magnus Olsen

Sammendrag

Det er knyttet stor usikkerhet ved analyse av sårbarhet overfor klimaendringer og fremtidige endringer i landoverflaten. Begge prosesser vil kunne endre hydrologiske forhold slik at urbane oversvømmelser og overløpsutslipp vil øke i omfang og frekvens. Dette vil da oppleves som et lavere servicenivå for de som måtte bli pårørt. Forskning som har blitt gjort angående klimaendring er ment for å løse andre spesifikke problemer angående dette temaet, og oppløsningen resultatene leveres i, passer ikke til simulering i urbane avløpsmodeller. Det finnes da flere metoder som tilpasser klimamodeller til det stedlige og tidsmessige oppløsningen urbane avløpsmodeller krever. En enkel metode blir gjennomført i denne oppgaven, men dette resultatet må ikke benyttes uten at beslutningstakere er innforstått med usikkerheten og antakelsene knyttet til metoden. En annen angrepsmåte for å analysere sårbarhet ovenfor eventuelle klimaendringer vil være å gjøre en enklere følsomhetsanalyse hvor registrerte regn skaleres med økende faktorer, der større faktorer representerer større klimaendringer. Ved denne måten omgås utfordringer med klimamodellene, og det faktum at faktiske klimaendringer er umulig å forutse sikkert, da utslippsscenarioene de baseres på er per definisjon like usannsynlige, styrker denne angrepsmåten. I denne oppgaven ble utvalgte regn valgt etter størrelse, og intensiteten ble skalert med opptil 50 %. Dette resulterte i at, avhengig av regn, antall kummer økte med kritisk oppstuvning med mellom 70 og 110 % i avløpsmodellen som dekker Charlottenlund og Ranheim i Trondheim kommune. Endret oppstuvningsnivå i hver enkelt kum varierer for alle kummene, og dette fører til at enhver kum må vurderes individuelt for å kartlegge eventuelle behov for lokale tiltak. På grunn av tidsbegrensninger ble det kun utført en analyse av korte regn med en varighet på maksimalt to timer. Regnene ble da valgt fra datasettet etter hva som ble antatt å gi mest oppstuvning i kummer i modellen. Parameteren som regnene ble valgt etter var total nedbørmengde over et gitt intervall, hvor et intervall på 15 minutter viste seg å gi regn som gav mye oppstuvning. Dette er et tidsintervall i størrelsesorden lik konsentrasjonstiden til flere flaskehals i avløpssystemet. Utvelgelsen av regn ble gjort med et MATLAB-skript, som gir maksimale nedbørshendelse per år klargjort for import til urbanhydrologisk simuleringprogramvare.

Ved siden av det hydrologiske aspektet gir denne oppgaven en presentasjon av norsk VA-sektors finansieringsmåte og en generell samfunnsøkonomisk kommentar til den økonomiske posisjonen sektoren befinner seg i. Aktuelle retningslinjer rundt selvkostprinsippet har en ordlyd som åpner for diskusjon om hvorvidt vedlikehold- og investeringsetterslep er ulovlig, men dette må eventuelt vurderes i en rettssal. VA-sektorene er en naturlig monopolist i sitt marked, og samfunnsøkonomisk sett mangler det naturlige intensiver til å få monopolisten til å yte samfunnsøkonomisk optimalt. Selvkostprinsippet sikrer at monopolistisk tilpasning unngås, men det er ikke et instrument til å sikre minimering av kostnader eller maksimering av servicenivå alene. Dette kan være grunnlag for et behov for større kontroll av VA-sektoren, for å beskytte abonnementene, slik at de betaler en rettferdig pris for tjenestene som utføres.

Abstract

There is considerable uncertainty in an analysis of the vulnerability of climate change and land use change. Both processes may change the hydrologic conditions in such way that urban flooding and overflow discharge will increase. The people affected by these effects will most certain experience a decreased level of service. Climate research tends to focus on other aspects than urban flooding, and thus the results from these climate models and predictions are on a different temporal and spatial scale than needed for urban hydrologic models. Several methods have been developed to adjust climate predictions on a scale suited for the mentioned models. One method, simple in structure, has been carried out in this thesis, but this result cannot be interpreted and used by any decision makers without their understanding of the uncertainties and assumptions related to the method. Another approach to analyze the vulnerability to any climate change scenario may be to do a simpler sensitivity analysis, where empirical rain intensity data is scaled by given factors. Larger factors represent more significant climate change. In this way, the challenges introduced by the climate models are omitted. De facto is that the actual climate changes are impossible to estimate, because the emission scenarios are equally improbable to happen per definition. In this thesis, the selected rain events is chosen by total precipitation, and the intensities where uniformly increased up to 50 %. The results from this analysis were that the total number of manholes with critical levels of flooding increased between 70 and 110% depending on rainfall event. The urban hydrologic model covers Charlottenlund and Ranheim in Trondheim municipality. The change in maximum level of water table in each manhole is different for almost every manhole, and this requires each manhole to be individually evaluated to determine any need for local measures of climate change mitigation. Because of time constraints, only a hydrologic truncated analysis was performed, where the analysis only simulated rain events with total duration less than two hours. The rain events were then selected from the data set after what was assumed to provide the most critical water table levels in the manholes of the model. The parameter, which the rain events were selected for, was the cumulated precipitation over a desired interval, where an interval of 15 minutes proved to give precipitation events which caused critical water table levels in the manholes. This time interval is almost equal to the time of concentration upstream bottlenecks identified in the system. The selection of the precipitation events was done with a MATLAB-script, which selects maximum precipitation events per year, ready for import into urban hydrologic simulation software.

Besides the hydrological aspect of this thesis, it also gives a presentation of Norwegian storm water management financing and a general economic commentary on the financial position of this sector. Recent guidelines around the cost of service principle are written in such a way that it allows for discussion on whether the maintenance and investment lag is illegal, but this needs to be considered in a courtroom. Water and sanitation management is a natural monopolist in its market, and the monopolist lacks natural incentives to act for society's greater good. Cost of service principle ensures that true monopolistic market behavior is mitigated, but it is not an instrument to minimize costs or maximize service level alone. This could be the basis for a need of another regulatory regime of the water and sanitation sector, to protect all of its subscriptions and ensure that they pay a fair price for the services performed.

Innholdsfortegnelse

Liste over figurer	iv
Liste over tabeller	vi
Liste over forkortelser	vii
1 ExFlood	1
2 Fokus til denne oppgaven	3
3 Klima og klimaendringer.....	4
3.1 Klimasystemet	4
3.2 IPCC.....	4
3.3 Scenarier.....	4
3.4 Klimamodeller	6
3.4.1 Globale klimamodeller	6
3.4.2 Regional nedskalering av klimamodeller.....	7
3.4.3 Skaleringsmetoder for observerte regndata	7
3.5 Globale klimaendringer	9
3.5.1 Registrerte endringer	9
3.5.2 Globale framskrivninger	10
3.6 Regionale og lokale forhold.....	11
3.6.1 Klimaet i Norge	13
3.6.2 Registrerte klimaendringer i Norge	13
3.6.3 Framskrivninger for Norge	14
3.6.4 Hydrologisk framskrivning for vassdrag i Norge.....	16
3.7 Usikkerhet ved klimamodellering.....	17
3.8 Oppsummering.....	19
4 Kommunen	20
4.1 Avløpssystemet	20
4.2 Lokal overvannshåndtering	22
4.3 Dimensjonerende normer	25
4.4 Trondheim kommunes VA-Norm om overvann	26
4.5 Fortetting og endret arealbruk i nedbørsfeltet	27
4.6 Finansiering av VA-sektoren	28
4.7 Samfunnsøkonomi.....	30
4.8 Konsekvenser for infrastruktur og miljø på grunn av endringer i den hydrologiske syklus..	34

5	DHI Mike Urban modellmiljø.....	35
5.1	Rask avrenning - Overflateavrenning.....	36
5.2	Avansert avrenning - RDII.....	37
5.3	Rørstrømning - HD.....	38
5.4	Rosie.....	39
5.5	Andre hydrologiske modeller fra DHI.....	39
6	Metode.....	40
6.1	Kalkulering av DCF.....	40
6.2	Utvelgelse av regnhendelser (1).....	41
6.3	Samstemming av regndata til korrekt fysisk tolkning.....	41
6.4	Statistisk analyse av regnhendelsene.....	45
6.5	Systemets respons for utvalgte regn (1).....	47
6.6	Utvelgelse av regnhendelser (2).....	49
6.7	Systemets respons for utvalgte regn (2).....	50
6.8	Parameteranalyse - følsomhetsanalyse.....	52
6.8.1	Andel tette flater.....	53
6.8.2	Konsentrasjonstid.....	54
6.9	Sårbarhetsanalyse for klimaendringer.....	55
7	Tiltak for sanering av Sjøskogbekken i Trondheim kommune.....	58
7.1	Bakgrunn.....	58
7.2	Forutsetninger.....	58
7.2.1	Dimensjonerende regnhendelse:.....	58
7.2.2	VA-systemet:.....	59
7.3	Tiltak for å hindre overløpsutslipp fra Sv. Svendsen.....	59
7.4	Tiltak for å hindre overløpsutslipp fra Ranheimsvegen.....	59
8	Diskusjon.....	60
8.1	Metodikk.....	60
8.2	Videre arbeid.....	61
9	Konklusjoner.....	62
10	Referanser.....	63
11	Vedlegg A: MATLAB-skript.....	65
11.1	analyse.m.....	66
11.2	lesDatafil.m.....	67
11.3	nedbor.m.....	69

11.4	gisData.m.....	72
11.5	gisData2.m.....	73
11.6	gisData4.m.....	75

Liste over figurer

Figur 1: Skisse av nedbørsfelt hvor det rurale område drenerer ned til og gjennom det urbane området med mer infrastruktur (ExFlood 2010).....	1
Figur 2: Skjematisk fremstilling av sammenhengen mellom arbeidspakkene i ExFlood prosjektet (ExFlood 2010).....	2
Figur 3: Illustrasjon av SRES klimautslipp til venstre og endring i global overflatetemperatur til høyre (IPCC 2007).	5
Figur 4: Temperaturresultater fra et ensemble av klimamodeller. Venstre del av figuren viser usikkerheten i simuleringsresultatene og høyre del av figuren viser at i nordområdene blir temperaturøkningen høyest (IPCC 2007).....	6
Figur 5: Illustrasjon av lineær økning i regnintensiteter frem mot år 2100. Dataene figuren er basert på er hentet fra DANVA (2007).	8
Figur 6: "Atmosfærisk konsentrasjon av viktige drivhusgasser som har lang oppholdstid over de siste 2000 år. Økningen etter ca. år 1750 er på grunn av menneskelig aktivitet i industrialderen. Enhetene for konsentrasjon er deler per million (ppm) eller deler per milliard (ppb), noe som er et mål på antall molekyler drivhusgass per million eller milliard luftmolekyler." Oversatt av forfatteren fra IPCC (2007).	9
Figur 7: Registrering av henholdsvis gjennomsnittlig global temperatur, havnivå og snødekke på nordre halvkule for perioden 1850 til 2000 (IPCC 2007).....	10
Figur 8: Illustrasjon av konveksjon av luftstrømmer mellom klimasonene og Corioliseffekten. Illustrasjonen er hentet fra forelesning om hydrologi i VANN200 (2009).	12
Figur 9: Illustrasjon av klimasoner ved forskjellige breddegrader og deres hydrologiske regimer. Illustrasjonen er hentet fra forelesning om hydrologi i VANN200 (2009).	12
Figur 10: Illustrasjon av orografisk nedbør. Illustrasjonen er hentet fra forelesning om hydrologi i VANN200 (2009).....	12
Figur 11: Inndeling av Norge i 13 nedbørsregioner hvor nedbørsmengdeutviklingen har vært forholdsvis lik. Figuren er hentet fra (Hanssen-Bauer et al. 2009).	13
Figur 12: Estimert relativ endring i årlig avrenning i Norge fra 1961-1990 til 2071-2100 for Hadley-modellen med scenario A2 og B2 og MPI-modellen med scenario B2 (Hanssen-Bauer et al. 2009). ..	17
Figur 13: Relativ årlig endring i årsavrenning og sesongavrenning i Trøndelag og Nord Norge fra 1961-1990 til 2071-2100 for Hadley-modellen med scenario A2 og B2 og MPI-modellen med scenario B2 (Roald et al. 2006).	17
Figur 14: Illustrasjon av hvordan effekter av klimaendringer kan analyseres for mindre lokale forhold. Usikkerhet er antatt å øke etter som man prøver å analysere mer lokale effekter, kontra globale effekter, som ikke er utsatt for den samme "arvede kjeden" av usikkerhet eller har det samme behovet for lokal beskrivelse av prosessene.....	18
Figur 15: Illustrasjon av de to konvensjonelle hovedtypene for urban behandling av vann hentet fra Svensk Vatten (2007). Øverste bildene viser konseptet for fellessystemet og nederste bildene for separatsystemet.....	20
Figur 16: Illustrasjon av konvensjonelt VA-anlegg hvor vannet fraktes vekk i lukkede ledninger (Lindholm et al. 2008).	21
Figur 17: Illustrasjon hvor overvann behandles med naturlige vannveier. Illustrasjonen er hentet fra Svensk Vatten (2007).....	22
Figur 18: Illustrasjon av LOD-tiltak i by (Lindholm et al. 2008).	23
Figur 19: Illustrasjon av trestegs strategi hvor tallene kun er eksempler(Lindholm et al. 2008).....	24

Figur 20: Illustrasjon som viser fortettingen i bydelen Lund i Kristiansand har endret seg siden 1962 og frem til 1998 (NORVAR 2004). Illustrasjonen er hentet fra (Lindholm et al. 2007) og er noe endret av forfatteren.	28
Figur 21: De tre standardutformingene til delfeltene i MOUSE med tilhørende tid-arealkurver (DHI 2008d).	37
Figur 22: Rutingsstrukturen til RDII-modulen (DHI 2008b).	38
Figur 23: Sammenligning av maksimal timesregn i 1969 før og etter omforming.	43
Figur 24: Bildet øverst til venstre, med Trondheimsfjorden i nord, viser lokalisasjon til utsnittene. Utsnitt øverst til høyre er for ubehandlet regn, mens utsnitt nede til venstre er for regn etter antakelse en, og utsnitt nede til høyre er for regn etter antakelse to.	44
Figur 25: Systemets respons for overflateavrenning fra største regn innenfor 60 minutter i år 2002.	47
Figur 26: Systemets respons for overflateavrenning fra største regn innenfor 60 minutter i år 1987.	47
Figur 27: Systemets respons for overflateavrenning fra største regn innenfor 60 minutter i år 2007.	48
Figur 28: Systemets respons for overflateavrenning fra største regn innenfor 60 minutter i år 2008.	48
Figur 29: Systemets respons for overflateavrenning fra største regn innenfor 60 minutter i år 1990.	48
Figur 30: Systemets respons for overflateavrenning fra største regn innenfor 15 minutter i år 2007. Fra fremstillingen av regnet kan det sees at dette regnet hadde en meget kort varighet, med ingen "forregn" og neglisjerbart "etterregn"	50
Figur 31: Systemets respons for hurtig avrenning fra største regn innenfor 15 minutter i år 2002, skravert opp med rødt. For- og etterregnet er tegnet med sort.	50
Figur 32: Systemets respons for overflateavrenning fra største regn innenfor 15 minutter i år 2008.	51
Figur 33: Systemets respons for overflateavrenning fra største regn innenfor 15 minutter i år 2006.	51
Figur 34: Systemets respons for overflateavrenning fra største regn innenfor 15 minutter i år 1987.	51
Figur 35: Analyse av modellens følsomhet for endring i andel tette flater.	53
Figur 36: Analyse av modellens følsomhet for endring i konsentrasjonstid.	54
Figur 37: Skalering opprinnelig regn fra 2008 (rød) til 50 % + intensitet (sort). De andre skaleringsfaktorene er utelatt på grunn av visuell presentasjon.	55
Figur 38: Antall kummer med oppstuvning mer enn 90 cm over topp rør for utvalgte regn med skalering av regnhendelsene.	56
Figur 39: Oversikt av endring i oppstuvning for kummer med oppstuvning over 90 cm topp rør ved 50 % skalering av 2008 regnet.	57
Figur 40: Dimensjonerende regnhendelse fra august måned i 2008. Regndata er hentet fra Risvolla nedbørmåler på eKlima.no.	58
Figur 41: Oversikt over aktuelle overløp for Sjøskogbrekken.	59

Liste over tabeller

Tabell 1: "Trender (prosent per tiår) i års- og årstidsnedbør for perioden 1900-2008. Trender signifikante på 1 % nivå er markert med uthevet skrift." Tabellen og tabelltekst er noe forenklet og hentet fra Hanssen-Bauer et al. (2009).....	14
Tabell 2: Estimerte endringer i årsnedbør med sesongvariasjoner for to ulike perioder og utvalgte områder i Norge (se Figur 11 for oversikt over nedbørsregionene) med spredningen i resultatene. Tabellen er endret av forfatteren for å vise områdene av spesiell interesse og er hentet fra Hanssen-Bauer et al. (2009).....	15
Tabell 3: Relativ endring i dager med mye nedbør og tilhørende relativ endring i nedbørsmengde for to ulike perioder og utvalgte områder i Norge (se Figur 11 for oversikt over nedbørsregionene). Tabellen er avkortet av forfatteren for å vise områdene av spesiell interesse og er hentet fra Hanssen-Bauer et al. (2009).....	16
Tabell 4: Estimering av renseeffekter i prosent for ulike LOD-tiltak (Lindholm et al. 2008).....	24
Tabell 5: Dimensjonerende gjentakintervall etter Norsk Standard NS-EN 752 1997 (Lindholm et al. 2008). * Oppstuvning til topp rør. ** Oppstuvning til kjeller- eller marknivå.	25
Tabell 6: Retningslinjer for dimensjonerende gjentakintervall for separat- og fellesavløpssystem fra Norsk Vann (Lindholm et al. 2008).....	25
Tabell 7: Dimensjonerende gjentakintervall ved drenering av vei (Vegdirektoratet 2011). * I områder der hvor overvann fra vei skal tilknyttes kommunale overvannssystemer, skal kommunale dimensjoneringsregler følges. ** Ved endring av vassdrag skal NVE kontaktes.	26
Tabell 8: Dimensjonerende gjentakintervall i VA – Normen til Trondheim Kommune (Trondheim-Kommune 2008).....	27
Tabell 9: Oversikt over fordeler og ulemper knyttet til tiltak mot økt avrenning fra urbane områder. Tabellen er oversatt av forfatteren etter Watt et al. (2003).....	32
Tabell 10: Oversikt over eksterne implikasjoner ved tiltak mot økt avrenning fra urbane områder. Tabellen er oversatt og forkortet av forfatteren etter Watt et al. (2003).	33
Tabell 11: Sesongmessig gjennomsnittlige DCF for Værnes.	40
Tabell 12: Største regnhendelse med varighet på en time eller mindre for år 1969. Den faktiske regnhendelsen kan være lengre.....	42
Tabell 13: Regnhendelser med størst nedbørsvolum innenfor 60 minutters intervall per år.	45
Tabell 14: De fem største årsmaksimum for nedbørshendelser innenfor 60 minutters intervall fra 1969 til 2009. Gjentakintervall (år) i parentes etter IVF-kurven. Verdier merket med NA er ikke tilgjengelig.	45
Tabell 15: Returperioder for nedbørsum i mm for Risvollan i Trondheim. Tabellen baserer seg på målinger fra 23 sesonger, fra 1987 til 2009. Tabellen er hentet fra eKlima.no.	46
Tabell 16: De fem største årsmaksimum for nedbørshendelser innenfor 15 minutters intervall fra 1969 til 2009. Gjentakintervall (år) i parentes etter IVF-kurven.	49
Tabell 17: Gjentakintervall for valgte regnhendelse. Gjentakintervall (år) i parentes etter IVF-kurven.....	58

Liste over forkortelser

A1, A1B, A1F1, A1T, A2, B1, B2 Utslippsscenarioer fra IPCC i SRES familien

AGCM Atmosphere General Circulation Model

ANSI American National Standards Institute

AOGCM Atmosphere Ocean General Circulation Model

BMP Best Management Practices

CBA Cost Benefit Analysis

CEA Cost Effectiveness Analysis

DCF Delta Change Factor

DCM Delta Change Method

DEA Data Envelopment Analysis

DHI Dansk Hydraulisk Institut

ENSO El Niño -Southern Oscillation

FNH Finansnæringens Hovedorganisasjon

GCM General Circulation Model

GIS Geographic Information System

HD Hydraulic Dynamics

IPPC The Intergovernmental Panel on Climate Change

IVF Intensitet Varighet og Frekvens

KRD Kommunal- og regionaldepartementet

LID Low Impact Development

LOD/LOH Lokal overvannsdiskonering/ Lokal overvannshåndtering

LTS Long Term Statistics

MATLAB Matrix Laboratory

MI Meteorologiske institutt

MOUSE Simuleringsprogram fra DHI

MPI Max Planck Institute

MU Mike Urban

NAO North Atlantic Oscillation

NORKLMA Klimaendringer og konsekvenser for Norge

NOU Norges offentlige utredninger

NVE Norges vassdrags- og energidirektorat

OGCM Ocean General Circulation Model

OV Overløp

RA Renseanlegg

RDII Rainfall Dependent Inflow and Infiltration

RIF Rådgivende Ingeniørers Forening

SFA Stochastic Frontier Analysis

SNL Store norske leksikon

SRES Special Report on Emissions Scenarios

UMB Universitetet for miljø- og biovitenskap

VA Vann og avløp

VAV Vann- og avløpsetaten i Oslo kommune

WP Work package

1 ExFlood

ExFlood er et forskerprosjekt som finansieres gjennom NORKLIMA. Bioforsk er koordinator og Statens Vegvesen, FHN, NVE og UMB er samarbeidspartnere. Tre kommunale deltakere (Fredrikstad, Sandnes og Trondheim), fra tre forskjellige kystklime i Norge, stiller med hver sin urbanhydrologiske modell fra nedbørsfelt som er antatt egnede for prosjektet. Studieområdene er valgt etter tilgjengelig data, eksisterende forskning, og historiske flomproblemer. Nedbørsfeltene kjennetegnes også med at oppstrøms i feltet er det lite utbygde områder (spredte boligfelt, skog og jordbruk) som så dreneres i en bekk/elv til nedstrøms urbane områder (ExFlood 2010). Slik kan da avrenningen skape problemer for infrastruktur i nedbørsfeltet.

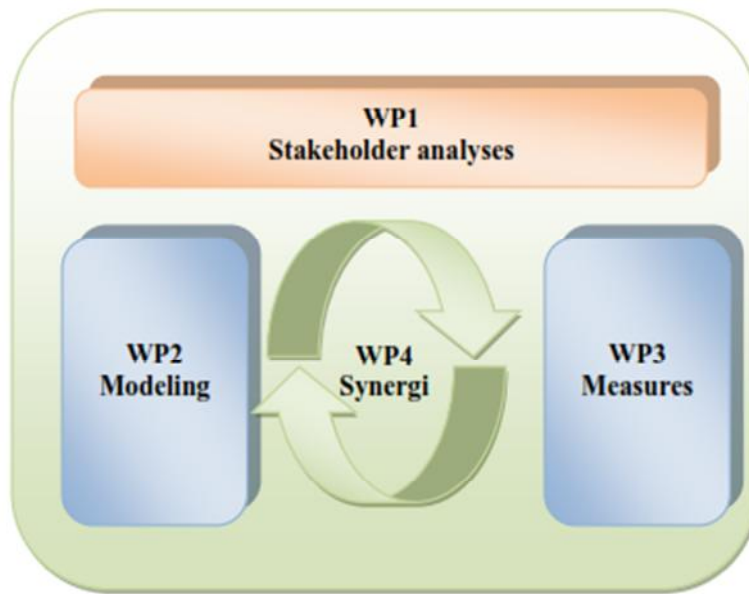


Figur 1: Skisse av nedbørsfelt hvor det rurale område drenerer ned til og gjennom det urbane området med mer infrastruktur (ExFlood 2010).

I dette prosjektet ønsker man å se på hvordan man med ulike tiltak kan redusere effektene av ekstreme værhendelser på infrastruktur i små sammensatte nedbørsfelt. Ved å simulere tiltakene i hydrologiske modeller kan man da vurdere effektene av dem, og så benytte dette til å konstruere et arealplanleggingsverktøy med lav brukerterskel. Dette planleggingsverktøyet kan da inngå i en økonomisk analyse av tiltak mot negative effekter som skyldes endret arealbruk og klima (ExFlood 2010).

Prosjektet vil ved å redusere maksimal avrenning og det totale avrenningsvolumet i nedbørsfeltet, minimere skader på bygninger, vei og annen infrastruktur. Det er rimelig å anta at det er de store volumfluksene som gir de største skadene.

ExFlood deles inn i fire arbeidspakker, som er vist illustrert i Figur 2 på side 2.



Figur 2: Skjematisk fremstilling av sammenhengen mellom arbeidspakkene i ExFlood prosjektet (ExFlood 2010).

Arbeidspakke en (WP1) skal kartlegge interessenter som pårøres av ekstremvær i små nedbørsfelt. Dette vil gjøres med utarbeidelse av spørreskjema og være en kvalitativ analyse. Registreringer av problemområder vil registreres i en geografisk database med detaljer om vær- og feltforhold (ExFlood 2010).

Arbeidspakke to (WP2) har som mål å lage en helhetlig hydrologisk modell av nedbørsfeltet. Dette gjøres ved at man samkjører flere hydrologiske modeller som det er hensiktsmessig å benytte på de ulike hydrologiske områdene det finnes i komplekse nedbørsfelt. Analyser på endret arealbruk, endret nedbør og klima og flomdempende tiltak skal gjennomføres. Dette krever data med høy oppløsning (ExFlood 2010).

Arbeidspakke tre (WP3) skal vurdere effektiviteten til tiltakene omtalt i WP1 og WP2. Resultatene skal presenteres i en tabell som inneholder informasjon om hvor effektive tiltakene er og hvordan de presterer under ulike forhold (ExFlood 2010).

Arbeidspakke fire (WP4) tar erfaringer og resultater fra de tre forrigegående arbeidspakkene og skal implementere dette i et arealplanleggingsverktøy (ExFlood 2010).

Denne masteroppgaven inngår i WP2 og WP3, men vil også benytte seg av resultater fra WP1. Det er viktig å poengtere at arbeidspakkene samhandler med hverandre gjennom en iterativ prosess og dette vil prege oppgaven.

NORKLIMA er et forskningsprogram som går i en tiårig programperiode fra 2004 til 2013. Dette programmet skal kartlegge hvilke konsekvenser klimaendringer vil ha for Norge. Det skal analyseres hvordan natur og samfunn påvirkes av et endret klima og hvilke klimatilpasninger man kan gjøre for samfunnets beste (Forskningsrådet 2010). Dette gjør at ExFlood er en naturlig del av målene til NORKLIMA.

Tidligere forskning på området har vist at økninger i nedbørintensiteter fører til kraftigere økning i flomvolum og skader (Evans et al. 2004).

2 Fokus til denne oppgaven

I denne oppgaven er det benyttet en urban avløpsmodell, som simuleres i MOUSE. Avløpsmodellen representerer et urbant nedbørsområde, som har blitt designet etter ett sett med regler, som kan ha endret seg over årene som har gått. Registrerte nedbørsmålinger fra representative nedbørstasjoner benyttes sammen med designregler til å dimensjonere avløpssystemene og nedbørsregimet er antatt å endres over tid, både som følge av naturlig klimavariasjon, men også på grunn av klimaendringer. I tillegg vil det være rimelig å anta at jordoverflaten vil endres på grunn av utbygging og hele nedbørsfeltet er da dynamisk. Dette er noe av bakgrunnen for fokuset til denne oppgaven, som da er:

- Presentere troverdig klimaforskning som kan brukes til å styrke antakelser om nedbør kritisk for avløpsmodellen.
- Gi en vurdering av verdien av metoder, som estimerer endring av nedbørsregimet, i en eventuell beslutningssituasjon.
- Utarbeide en metode som kan finne kritiske nedbørsituasjoner for avløpsmodellen.
- Finne et egnet regn som kan fungere som et designregn ved tiltak for å hindre overløpsutslipp i aktuelt byvassdrag og simulere tiltak i avløpsmodellen for å motvirke dette.
- Gi en presentasjon av økonomisk teori som er relevant for den kommunale VA-bransjen.

3 Klima og klimaendringer

3.1 Klimasystemet

Det globale klimasystemet utgjøres av konveksjonen mellom gasser, væsker og oppløst stoff i hav, atmosfære, land, is og biomasse (Davies & Simonovic 2005).

Dette drives av stråling fra sola og blir forsterket og endret av globale effekter på jorda. Parametere som påvirker dette systemet er solaktivitet, kosmisk stråling, ozonlag, klimagasser, partikler i atmosfæren, jordas effektive albedo, topologiske forhold etc. Dynamikken mellom de forskjellige prosessene er kompliserte, men for å forstå klimasystemene og effektene av antroposentrisk påvirkning, er det viktig at modeller tar høyde for hvordan effekten av menneskelige utslipp kan bli forsterket på grunn av klimasystemets selvforsterkende mekanismer (Davies & Simonovic 2005).

Dette styrer luftstrømmer, havstrømmer og resten av vannets kretsløp og produserer da det vi opplever som vær.

Klima kan beskrives som opplevd regn over lengre tid for et gitt område, der hvor både gjennomsnittlig nedbør og ekstremnedbør er med på å definere klimaet (Buchdal & Hare 2000; Iversen et al. 2005).

3.2 IPCC

IPCC står for "The Intergovernmental Panel on Climate Change" og har som formål å sammenstille ulike forskningsresultater som er relevant for å kunne forstå klimaendringene. Oppgaven innebærer at de først må gjennomgå og kvalitetssikre nye og relevante forskningsrapporter, før de inkorporerer resultatene i sine egne rapporter.

Materialet som har bidratt til IPCCs egne rapporter har vært med i en selektiv prosess og IPCC spiller da ikke all forskning som finnes på området, men materialet blir igjen kvalitetssikret av eksterne eksperter og myndigheter som skal sikre IPCCs objektivitet.

3.3 Scenarier

Estimering av fremtidige klimaendringer er resultatene fra ulike klimamodeller, men de må baseres på et scenario som tar antakelser om fremtidig teknologisk, økonomisk og sosial utvikling. IPCC har laget flere scenarier og nyeste generasjon er SRES (Special Report on Emissions Scenarios). Nilsen (2008) og Holvik (2010) skrev om hvordan SRES har endret seg fra forrige sett med scenarier (IS92). SRES er blitt endret på flere forhold siden forrige revidering, da forståelsen for drivkreftene for utslippene har økt. Dette er f. eks endret syn på svovelutslipp, karbonintensitet i energisektoren og inntektsfordelingen mellom fattig og rik del av verden (Nakicenovic et al. 2000). Dette viser at det ikke bare er usikkerhet i hvilket scenario som kommer til å bli gjeldende (alle må antas å være like usannsynlige (Nakicenovic et al. 2000)), men også usikkerhet i de fundamentale forutsetningene scenarioene bygger på. Dermed er ikke SRES scenarioene oppdatert på nyere politisk utvikling eller økonomiske sjokk, men for de som har fulgt med i media, så har man enda ikke klart å fordele ansvar og fremtidig klimakutt på en akseptabel måte med konsensus.

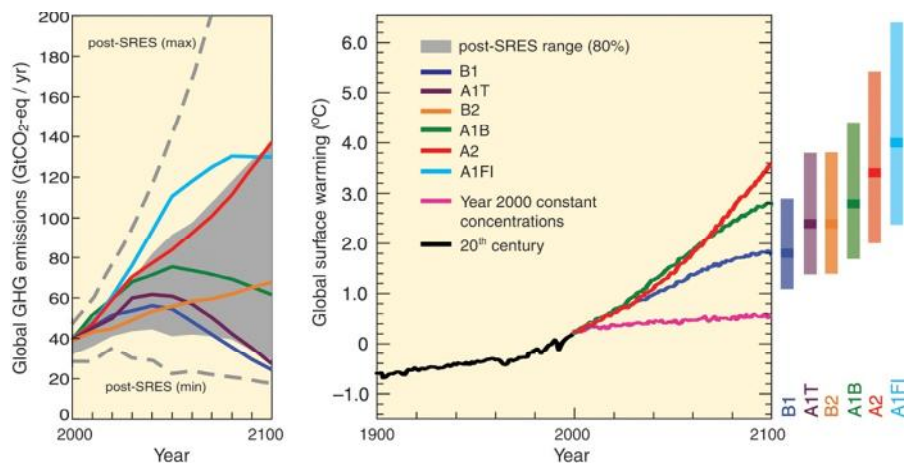
SRES kan deles opp i fire hovedkategorier som beskriver ulike fremtidshistorier frem mot 2100. Disse er:

A1: Fremtidig verden har rask økonomisk vekst. Befolkningsantallet vil øke mot midten av århundret, men etter det vil den avta. Teknologisk utvikling vil være slik at renere og mer effektiv teknologi vil bli introdusert. Inntektsforskjellene mellom den fattige og rike delen av verden vil utjevnes. Avhengig av hvilken energiform A1 scenarioet baserer seg på, introduserer flere underscenarioer. Det blir gjort forskjell på om energiforbruket forblir fossilintensivt (A1F1), alternativt kan det bli en energivridning mot andre energikilder (A1T) eller utviklingen kan gå mot en mellomting mellom disse to underscenarioene (A1B) (Nakicenovic et al. 2000).

A2: Fremtidig verden er preget av store forskjeller hvor regional uavhengighet står sentralt. Dette gir utslag i fortsatt skjeve fødselsrater og økonomisk vekst mellom regionene, og resultatet blir kontinuerlig befolkningsvekst. Teknologisk utvikling skjer saktere enn i de andre scenarioene (Nakicenovic et al. 2000).

B1: Befolkningsvekst og økonomisk utvikling vil følge det samme mønsteret som A1. Men globalt samarbeid fører til bærekraftige løsninger. Det materielle fokuset vil avta, og renere og mer effektiv teknologi vil komme (Nakicenovic et al. 2000).

B2: Befolkningsantallet vil øke konstant, men mer moderat enn i A2 scenarioet. Det fokuseres på lokale løsninger for å sikre økonomisk og miljømessig bærekraft. Det er moderat økonomisk utvikling og teknologisk utvikling er tregere og mer variert enn i B1 og A1 scenarioene (Nakicenovic et al. 2000).



Figur 3: Illustrasjon av SRES klimautslipp til venstre og endring i global overflatetemperatur til høyre (IPCC 2007).

Figur 3 viser hvor ulike SRES scenarioene er i forhold til fremtidig utslipp og fremtidig overflatetemperatur. Lengst til høyre vises usikkerheten til temperaturen i form av et intervall. Dette intervallet representerer resultatene fra mange klimamodeller, som vi nå skal se videre på.

3.4 Klimamodeller

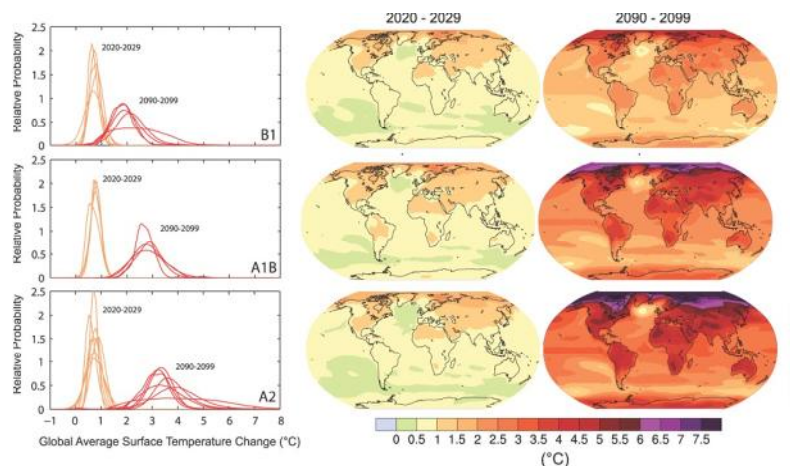
3.4.1 Globale klimamodeller

Klimamodeller kan klassifiseres ut ifra kompleksitet, oppløsning og bruk av modellene. De enkleste modellene har meget grov oppløsning og kan kun produsere gjennomsnittlige resultater for f. eks temperatur på en global skala. Disse egner seg ikke for estimering av regn (Davies & Simonovic 2005).

De mer kompliserte modellene, som egner seg til avanserte og detaljerte klimasimuleringer, er de modellene som kalles GCM (General Circulation Model). Det finnes en rekke forskjellige modeller som gjør dette, hvor det er ulike områder og prosesser for hva som vektlegges og beskrives best mulig. Modellene produserer da også forskjellige resultater, selv fra samme inndata, som typisk kan være konsentrasjoner av klimagasser i atmosfæren ved gitte tidspunkter.

For å få en modell til å beskrive de fysiske prosessene bedre kan det kobles sammen ulike GCM. De mest moderne modellene er sammenkoblede modeller som har utgangspunkt fra AGCM (atmosfæremodeller) og OGCM (havmodeller) og utgjør da moderne koblede modeller (AOGCM) som benyttes for å estimere fremtidig klima (Arnell 2002). Modellene har en fysisk beregning av temperatur og strømningsmønstre i hav og atmosfære. Videre kan det benyttes forenklete beskrivelser av prosesser som skydekke, markvanninnhold og varmestråling (Hanssen-Bauer et al. 2009).

De koblede klimamodellene gjør gode simuleringer og produserer troverdige resultater for relative klimaendringer med sesongvariasjoner på kontinent- og subkontinentsskala. Modellen estimerer endringen slik at den viser endringene mellom simulert nåtid og simulert fremtid, og disse forskjellene må overføres til observert klima for å få absolutte klimaendringer (Arnell 2002). De har ikke mulighet til å produsere regionale eller lokale estimeringer av klimaendringer. Dette skyldes blant annet den grove oppdelingen av de romlige elementene og at land(overflate)-atmosfæriske prosesser er dårlig beskrevet og passer da ikke til hydrologiske konsekvensanalyser (Arnell 2002). Dessuten blir nedbør sterkt endret av blant annet topografi (Davies & Simonovic 2005).



Figur 4: Temperaturresultater fra et ensemble¹ av klimamodeller. Venstre del av figuren viser usikkerheten i simuleringresultatene og høyre del av figuren viser at i nordområdene blir temperaturøkningen høyest (IPCC 2007).

¹ Ensemble er en gruppe av flere modeller (Davies & Simonovic 2005).

Ved å anta effekten av fremtidige klimaendringer er det flere kilder til usikkerhet, og noen steder er prosessene ennå ikke fullt ut forstått. Klimaprognoser er dermed bare beste kvalifiserte estimater, som er et resultat av at det først må antas et scenario for fremtidig teknologisk, økonomisk og sosial utvikling, som medfører et gitt nivå av klimagassutslipp. Dette scenarioet benyttes så som input i klimamodeller som produserer resultater som er romlig og tidsmessig grovt oppdelt.

3.4.2 Regional nedskalering av klimamodeller

Regionale og lokale analyser krever som nevnt modeller som har finere inndeling i romoppdelingen og mindre tidssteg. Tidsstegkravet kommer av at mindre vassdrag har raskere responstid og krever da nedbørsdata bedre oppdelt enn total nedbørsmengde per døgn som globale modeller leverer (Davies & Simonovic 2005).

For å få scenarioene over på mer egnet romlig og tidsmessig oppløsning, må GCM-simuleringene nedskaleres. Det finnes flere teknikker for denne nedskaleringen, hvor Arnell (2002) nevner tre metoder. Interpolering av GCM-resultatene er den enkleste måten, hvor resultatene fra denne interpoleringen kan skalere observerte nedbørshendelser. Alternativt kan statistiske metoder, som beskriver den statistiske sammenhengen mellom lokalt og regionalt klima, benyttes. Begge metodene baserer seg på sammenhengen mellom klima på regionalt og lokalt nivå ikke endres over tid. Det er blandete erfaringer med disse metodene (Arnell 2002). Den siste metoden er å benytte en dynamisk regional atmosfæremodell (RCM) som får grensebetingelsene fra en GCM. RCM har da finere oppløsning enn GCM og kan beskrive lokale forhold bedre, med mer nøyaktig beskrivelse av topografi og land-atmosfæreprosesser (Arnell 2002).

3.4.3 Skaleringsmetoder for observerte regndata

Det er blitt gjort flere forskjellige lokale tilpasningsmetoder som har gått ut på å skalere observert nedbør for å kompensere for klimaendringer. Metodene er forskjellige i hvordan nedbøren skaleres og hvilke antakelser disse skaleringsfaktorene bygges på. Metodene basert på resultater fra klimamodeller kalles "Delta Change Methods" og kan grovt forenklet beskrives med formelen (Holvik 2010):

$$DCF = \frac{\textit{Scenario volume}}{\textit{Control volume}}$$

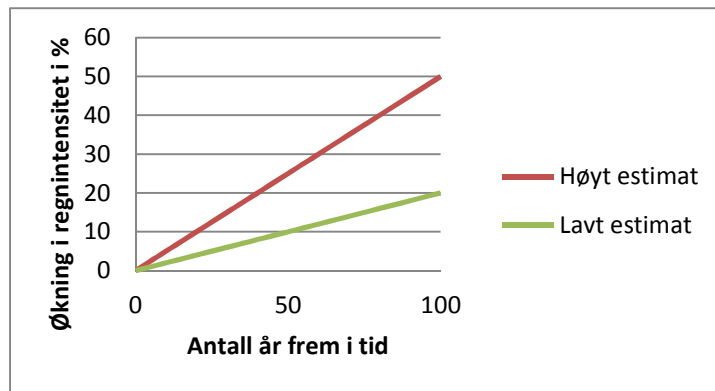
Formel 1: Grov fremstilling av formelen for Delta Change Factoren.

Formel 1 er en generalisering av DCM. "Scenario volume" og "Control volume" er resultater fra AOGCM- eller RCM-modeller, der hvor godt oppdelte RCM-modeller i sted og rom kan gi mest detaljerte DCF-fordelinger. Faktorene kan avhenge av sesong, intensitet, sted og år for scenarionedbøren(Nilsen 2008).

Nilsen (2008) utførte i sin masteroppgave en avansert DCF skalering av en observert nedbørsserie for Blindern i Oslo. Her var utgangspunktet for Formel 1 en linket AOGCM- og RCM-modell for Norge hvor IS92a og SRES B2 var antatte scenarioer. RCM-modellen, som ble benyttet, gav resultater på en times oppløsning og Nilsen konstruerte da DCF-fordelinger for nedbør rangert etter intensitet for de forskjellige sesongene for blant annet scenario B2 i perioden 2071-2100. Fra modellkjøringen vil da forholdet mellom scenario time med mest nedbør (den timen inneholder det kraftigste regnet) og control time med mest nedbør tilsvare DCF for den nedbøren med kraftigst intensitet. Regn med høy intensitet kan forvente en annen økning enn regn med lav intensitet ved bruk av denne metoden.

Holvik (2010) utførte i sin masteroppgave en forenklet DCM til å skalere observerte nedbørsserier. Metoden ble benyttet for å analysere klimaendringer for sesongene. Dette er en enklere metode som kun ser på gjennomsnittlige endringer for regnet over sesongene, men den konstruerte 120 DCF for fire sesonger over 30 år (2071 – 2100).

DANVA (2007) foreslo en lineær økning av regnintensiteten for ti års regn vil øke med mellom 20 og 50 % og de kan da si noe om når avløpssystemet ikke lenger tilfredsstillers det funksjonskravet som er satt. Det blir ikke gjort noen lokal vurdering ut over dette, men intervallet mellom 20 og 50 % er et resultat av at tilgjengelige metoder estimerer fremtidig klima med stor usikkert ved benyttelse av en rekke antakelser.

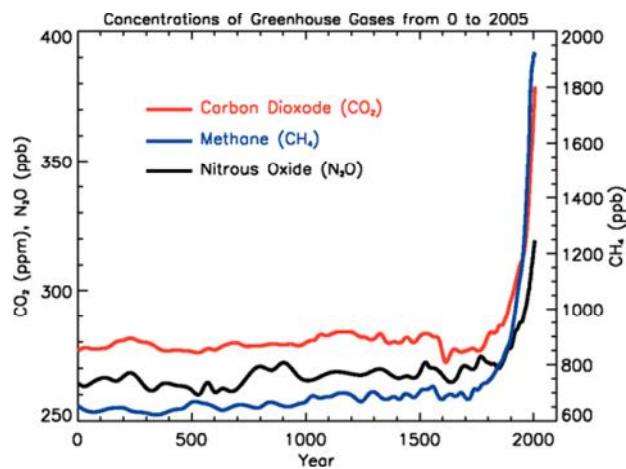


Figur 5: Illustrasjon av lineær økning i regnintensiteter frem mot år 2100. Dataene figuren er basert på er hentet fra DANVA (2007).

3.5 Globale klimaendringer

3.5.1 Registrerte endringer

Historisk sett har klimaet endret seg. I vikingtiden var gjennomsnittstemperaturen høyere i Norge enn nå, men dette kan forklares med naturlige variasjoner (Hanssen-Bauer et al. 2009). Dagens klimadiskusjon gror ut i fra antakelsen om at registrerte økninger i CO₂ skyldes samfunnets endring etter den industrielle revolusjon. Denne økningen av konsentrasjon av klimagasser i atmosfæren kan sees i Figur 8. I industritidsalderen har flere ressurser blitt utnyttet på en måte som skiller seg fra tidligere. Dette har muliggjort en økning i både velferd og befolkning. Utnyttelsen av fossile energikilder og endret bruk av land (avskoging etc.) er hovedgrunnene for økning av karbondioksidkonsentrasjonen i atmosfæren. Moderne jordbruk er på den annen side årsaken til økte konsentrasjoner av metan og nitrogenoksid (IPCC 2007).



Figur 6: "Atmosfærisk konsentrasjon av viktige drivhusgasser som har lang oppholdstid over de siste 2000 år. Økningen etter ca. år 1750 er på grunn av menneskelig aktivitet i industrialderen. Enhetene for konsentrasjon er deler per million (ppm) eller deler per milliard (ppb), noe som er et mål på antall molekyler drivhusgass per million eller milliard luftmolekyler." Oversatt av forfatteren fra IPCC (2007).

IPCC har i sin nyeste sammendragsrapport listet opp en rekke observerte endringer i klimaendringer. Det er blitt observert endringer på flere områder, som hver har ulik betydning for forskjellige beslutningstakere. Observerte endringer er oppsummert i listen under (IPCC 2007):

Endringer i atmosfære og landoverflate:

- Fra en periode fra 1906 til 2005 er det observert en økning i gjennomsnittlig overflatetemperatur på 0,74 °C, hvor det har vært en rask økning i de siste årene.
- Ekstremtemperatur har hatt en vridning mot at de kaldeste døgnene er blitt mer sjeldne og de varmeste døgnene mer vanlige².
- Potensiell evapotranspirasjon har økt.
- Det er observert lengre og verre tørkeperioder
- Nedbørsmengde har for noen områder økt, mens andre områder har blitt tørrere. For Nord-Europa har nedbørsmengdene økt, mens f. eks Middelhavsområdene har blitt tørrere.
- Det er observert at mer nedbør faller som regn.

² IPCC (2007) definerer ekstremt varme dager som de som er varmere enn 90 prosentilet. Ekstremt kalde dager er på samme måte definert som de dagene kaldere enn 10 prosentilet.

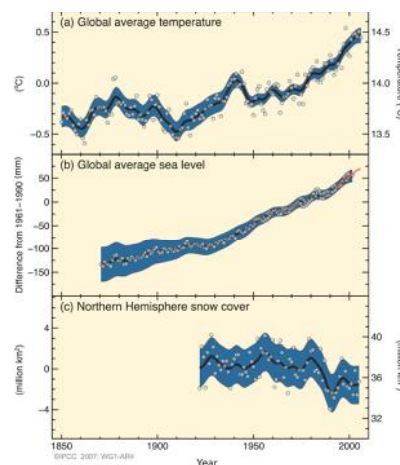
- Både områder som har hatt nedgang og økning i nedbørsmengde har hatt økning i ekstreme nedbørstilfeller³.
- Det har vært en signifikant økning i de sterkeste tropiske sykloner, både i varighet og styrke.
- Det er registrert at totalt antall av sykloner har gått ned.
- Det er observert endringer i NAO (North Atlantic Oscillation) og ENSO (El Niño -Southern Oscillation), noe som kompliserer effekten av klimaendringene.

Endringer i kryosfæren:

- De fleste isbreer blir mindre globalt sett.
- I Arktis trekker sjøisen seg tilbake i alle sesonger.
- Det totale volumet av innlandsisen i Antarktis og Grønland har blitt mindre.

Endringer i havet:

- Det er registrert en økning i havtemperaturen ned til 3000 m.
- Det globale havnivået har økt med ca. 0,17 m, som kommer fra smelting av innlandsis og termisk ekspansjon av vannet.



Figur 7: Registrering av henholdsvis gjennomsnittlig global temperatur, havnivå og snødekke på nordre halvkule for perioden 1850 til 2000 (IPCC 2007).

Ved flere av disse observasjonene er det tilknyttet stor usikkerhet, både i form av at prosessene ikke er fullt ut forstått, samt at det er utfordringer med tilgjengelig data. Men IPCC (2007) har sammenfattet flere forskningsrapporter og resultatene er beste tilgjengelige estimater.

3.5.2 Globale framskrivninger

Ved globale klimaframskrivninger benyttes klimamodeller, som forklart i kapittel 3.4.1., hvis det benyttes kun en modell får man dårligere klimaresultater enn hvis man benytter et ensemble av flere modeller. Et ensemble vil også kunne ta hensyn til flere tilfeldige klimavariasjoner i modelleringen (Iversen et al. 2005).

IPCC har ved å benytte et ensemble av flere klimamodeller produsert klimaprojeksjoner for blant annet scenarioene omtalt i kapittel 3.3. På denne måten er resultatene deres preget av alle

³ IPCC (2007) definerer ekstreme nedbørstilfeller etter nedbørsmengde per døgn.

modellene i ensemblet. Noen av de estimerte klimaendringene fra IPCC (2007) vises oppsummert i punktene under:

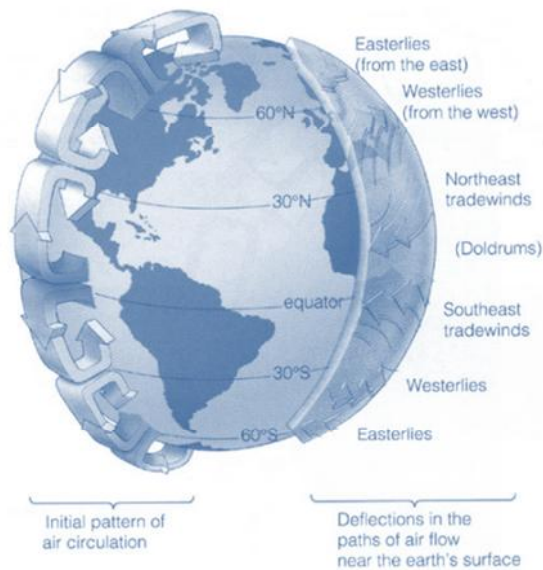
- Gjennomsnittlig temperatur er estimert til å stige med mellom 1,8 °C og 4,0 °C avhengig av hvilket scenario som velges.
- Det er veldig sannsynlig at ekstremtemperatur forsterkes fra det som allerede er registret (se kapittel 3.5.1).
- Simuleringene estimerer en forsterkning i den globale hydrologiske syklus, noe som betyr at det globale gjennomsnittet for fordampning og nedbør vil øke. Dette vil si at det er forventet en økning i nedbør i tropene og ved høye breddegrader, mens subtropene vil forvente en nedgang i nedbørsmengde.
- Nedbørintensiteten blir estimert til å øke i tropene og ved høye breddegrader.
- Snø og isdekket er forventet å bli mindre.
- Gjennomsnittlig havnivå er forventet å øke. For det scenarioet med lavest konsentrasjon av CO₂ (B1) er havnivået forventet å øke mellom 0,18 m og 0,38 m. For scenarioet med høyest konsentrasjon (A2) er den forventede økningen på mellom 0,26 m og 0,59.

Disse resultatene er bundet til mye usikkerhet fra modellene som benyttes, da de har ulike styrker og svakheter ved å beskrive komplekse systemer hvor interaksjonen mellom komponentene ikke fullt ut er forstått (Iversen et al. 2005). Men resultatene omkring nedbørhendelsene ved klimamodellene samsvarer med fundamentale prinsipper, der hvor høyere temperaturer vil føre til en mer aktiv hydrologisk syklus med mer intens regn (Arnell 2002). Vi vil nå se litt mer på lokale forhold, som er en viktig del av beslutningsgrunnlaget angående tilpasning og formildning av fremtidige klimaendringer på lokalt nivå.

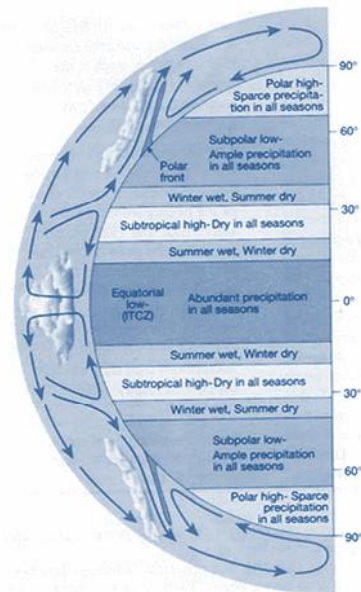
3.6 Regionale og lokale forhold

En utfordring med globale klimamodeller og resultatene fra de, er at klimamodellene først og fremst er ment for å gi svar på klimautvikling for store områder (Buchdal & Hare 2000), mens i urbanhydrologi fokuseres det på mindre områder, ofte begrenset ned til små nedbørsfelt, som krever data tilpasset de lokale forholdene. Den samme utfordringen gjelder også for tidsoppløsningen. Klimaforskerne har med sine modeller fokus på årsbasis eller for enda lengre perioder (f. eks 2071 – 2100), mens utfordringer knyttet til lokal hydrologi har behov for nedbørsdata oppløst ned til minuttet for å passe til systemene med relativt hurtig respons. Utviklingen går imidlertid mot bedre oppløste klimamodeller som kan produsere resultater bedre egnet for urbanhydrologisk bruk (Davies & Simonovic 2005).

Det er en rekke fysiske prosesser som gir regioner forskjellige klimatyper. Generelt sett så har breddegrad stor betydning, av den grunn solenergien avtar når man beveger seg fra ekvator og opp mot polene. Dette skaper da temperaturforskjell mellom klimasoner, som igjen medfører konvektive luftstrømmer fra ekvator mot polene (Buchdal & Hare 2000). Figur 8 viser en illustrasjon av luftstrømmer mellom forskjellige globale klimasonene drevet av konveksjon og Figur 9 illustrerer klimaregimene ved forskjellige breddegrader.



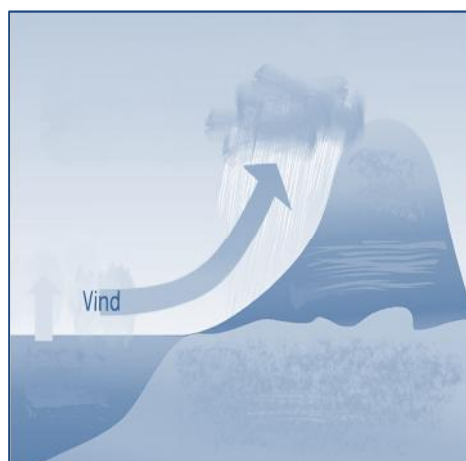
Figur 8: Illustrasjon av konveksjon av luftstrømmer mellom klimasonene og Corioliseffekten. Illustrasjonen er hentet fra forelesning om hydrologi i VANN200 (2009).



Figur 9: Illustrasjon av klimasoner ved forskjellige breddegrader og deres hydrologiske regimer. Illustrasjonen er hentet fra forelesning om hydrologi i VANN200 (2009).

På grunn av jordens rotasjon vil luftstrømmene bøyes av, og dette kalles Corioliseffekten. Disse vindene endrer seg noe over året og forårsaker blant annet regntiden i Sørøst Asia (Buchdal & Hare 2000). Historisk sett har disse vindene vært viktige for seilbåtene og i Norge ble de omtalte blant sjømenn som Passatvindene. For Nordens hydrologi har Vestavindsbeltet stor betydning, da det er grunnlaget for frontnedbør. Dette skjer da mild fuktig luft fra sør i Atlanterhavet presses opp av kald og tørrere luft nordfra og avgir nedbør (Tollan 2002).

Frontnedbør kan forsterkes av topografi, og da kalles det orografisk nedbør. Denne effekten gjør at det er veldig skjev nedbørsfordeling mellom områder på Vestlandet og østbygdene.



Figur 10: Illustrasjon av orografisk nedbør. Illustrasjonen er hentet fra forelesning om hydrologi i VANN200 (2009).

3.6.1 Klimaet i Norge

På grunn av Golfstrømmen og NAO, så er klimaet i Norge varmere enn de fleste andre steder på samme breddegrad. Gjennomsnittlig årsmiddeltemperatur er ca. + 1 °C, men Vestlandet er vesentlig varmere og høyfjellet er vesentlig kaldere (Hanssen-Bauer et al. 2009).

Gjennomsnittlig årsnedbør er 1468 mm, hvor 346 mm fordampes og resten går til avrenning. Områder i regnskyggen (f. eks øvre deler av Gudbrandsdalen) har 300 mm målt årsnedbør, mens noen områder på Vestlandet har over 5000 mm årsnedbør. Ett døgn nedbør for de samme områdene har enda større variasjon. De tørreste områdene opplever ettdøgnsnedbør, som i snitt overskrider tre til fire ganger per år, fra under 15 mm nedbørmengde, mens de våteste områdene har tilsvarende nedbørmengder på ca. 150 mm per år (Hanssen-Bauer et al. 2009).

Østlandet har de høyeste nedbørmengdene for nedbør med varighet mellom et minutt og en time. For nedbør med varighet på mellom to og seks timer er det Sørlandet som har de høyeste nedbørmengdene. For nedbør av lengre varighet (tolv timer og oppover er det Vestlandet som har de høyeste nedbørmengdene (Hanssen-Bauer et al. 2009).

3.6.2 Registrerte klimaendringer i Norge

Som nevnt i kapittel 3.5.1 har Norge historisk sett hatt gjennomsnittstemperaturer som er signifikant høyere enn i dag, men dette kan forklares fra naturlige årsaker. Vikingtiden kan trolig forklares varmere på grunn av høy solaktivitet og lav vulkansk aktivitet (Hanssen-Bauer et al. 2009).

I det siste århundre er det registeret at årsmiddeltemperaturen har økt med ca. 0,8 °C, hvor den største økningen har vært om våren. Dette har gitt utslag på lengre vekstsesong, lavere fyringsgradsum⁴ og kortere snøsesong (Hanssen-Bauer et al. 2009).

Siden år 1900 har årsnedbøren for fastlands-Norge økt med ca. 20 %, hvor Vestlandet og Østfold har opplevd den største nedbørsøkningen (Hanssen-Bauer et al. 2009).



Figur 11: Inndeling av Norge i 13 nedbørsregioner hvor nedbørmengdeutviklingen har vært forholdsvis lik. Figuren er hentet fra (Hanssen-Bauer et al. 2009).

⁴ Fyringsgrad kan defineres som differansen mellom døgnmiddeltemperatur, gitt at døgnmiddeltemperaturen er lavere enn 10 °C, og 17 °C. Summen av alle disse fyringsgradene er da fyringsgradsummen (Hanssen-Bauer et al. 2009).

I Figur 11 Ser vi inndelingen av Norge i regioner som har hatt forholdsvis lik utvikling i årsnedbør. Sjøskogbrekken nedbørsfelt befinner seg i region nummer ti, på grensen til område ni. Detaljert informasjon om nedbørsutviklingen for områdene nær Sjøskogbrekken finnes i Tabell 1, hvor man ser at Trøndelag (sone ti) har hatt en økning av total årsnedbør på 18 % over 100 år. For vårmånedene er det signifikante økningen enda større for Trøndelag.

Det er observert en generell økning i vannføring i elver om vinteren og våren. Snøsmeltingen skjer dessuten tidligere (Hanssen-Bauer et al. 2009).

Tabell 1: "Trender (prosent per tiår) i års- og årstidsnedbør for perioden 1900-2008. Trender signifikante på 1 % nivå er markert med uthevet skrift." Tabellen og tabelltekst er noe forenklet og hentet fra Hanssen-Bauer et al. (2009).

Region	8	9	10	Norge
År	1,8	1,5	1,8	1,7
Vinter	2,9	2,9	2,9	2,4
Vår	2,1	1,6	2,3	1,9
Sommer	0,8	0,6	1,0	0,8
Høst	1,6	1,5	1,4	1,9

Det er registrert en økning i havnivået utenfor Norge på 14 cm siden 1900, men landhevingen har virket som en buffer, slik at i Norge har havet ikke steget relativt til landnivået (Hanssen-Bauer et al. 2009).

3.6.3 Framskrivninger for Norge

Ved regionale klimaframskrivninger for Norge har det blitt benyttet flere metoder, som er beskrevet i kapittel 3.4.2. Hanssen-Bauer et al. (2009) har samlet mye av det som finnes av framskrivninger for Norge, hvor det er benyttet flere empirisk-statistiske metoder og dynamiske modeller, og dette er samlet i en rapport. Modellene er kjørt i grupper (ensembler). Dette synliggjør noe av usikkerheten som finnes i modellene og metodene, og resultatene fra klimaframskrivningene må vurderes varsomt. Samtidig har gjennomsnittsverdier fra de statistiske og dynamiske ensemblene gitt bedre beskrivelse av nåtidens klima enn en enkelt modell. Klimadata benyttet til hydrologisk modellering har blitt statistisk nedskalert fra RCM for å ta høyde for topografisk informasjon. Grove trekk i klimautviklingen i Norge er oppsummert i punktene under (Hanssen-Bauer et al. 2009):

- Temperaturen vil øke i alle landsdeler i Norge. Årlig gjennomsnittstemperaturen kan i år 2100 være 2,3 til 4,6 % °C varmere enn i dag. De nordlige områdene vil få den største temperaturøkningen.
- Årsnedbøren vil øke i hele Norge. For forskjellige områder vil økningen ligge mellom fem og 30 % mot 2100.
- Nedbør om vinteren vil øke med mer enn 40 % i områder i Øst-, Sør- og Vestlandet.
- Nedbør om sommeren vil avta mot år 2100 på Sør- og Østlandet.
- For hele landet og alle årstider vil dager med mye nedbør øke, og nedbørsmengdene for disse dagene blir større.
- Det er estimert en avkorting av snøsesongen for hele landet. Lavlandet får den største reduksjonen.
- Størrelsen på regnflommer er antatt å øke, da det er antatt mer intens nedbør.

- Størrelsen på smeltevannsflokker kommer til å avta, da magasinerings av vann i snø er antatt å avta mot år 2100. Et varmere klima kan også endre tidspunktet for høstflom og vårflom, da vinterperioden er antatt å bli kortere.
- Havnivået er antatt å stige mellom 40 og 70 cm for forskjellige deler av landet. I Indre deler av Trondheimsfjorden vil havet kunne stige med 40 cm.

I Tabell 2 vises resultatene fra estimert endring i årsnedbørsum fra de nyeste klimaenssemblene for Norge og Trøndelagsområdet spesielt. Fra dagens nivå til perioden år 2071 – 2100 øker årsnedbøren i Trøndelag ca. 22 % med mindre sesongvariasjoner. Dette er da resultater fra modellene som hadde medium resultater⁵. Ser vi på resultatene fra de modellene med høye resultater, ligger sesongvariasjonen mellom ca. 36 og 61 %.

Tabell 2: Estimerte endringer i årsnedbør med sesongvariasjoner for to ulike perioder og utvalgte områder i Norge (se Figur 11 for oversikt over nedbørsregionene) med spredningen i resultatene. Tabellen er endret av forfatteren for å vise områdene av spesiell interesse og er hentet fra Hanssen-Bauer et al. (2009).

Region	Sesong	1961–90 til 2021–50:			1961–90 til 2071–00:		
		Endring (%) i nedbørsum			Endring (%) i nedbørsum		
		M	L	H	M	L	H
Norge	År	9,6	2,4	14,0	18,3	5,4	30,9
	Vinter DJF	11,1	3,8	18,4	21,4	8,5	39,9
	Vår MAM	10,0	3,7	20,0	19,4	7,2	41,5
	Sommer JJA	5,0	-1,6	9,7	9,2	-3,2	17,4
	Høst SON	12,2	2,1	16,1	23,3	4,6	33,4
NR-8 Møre og Romsdal	År	12,0	-0,5	23,3	22,0	-1,0	42,7
	Vinter DJF	11,7	-4,0	23,3	21,4	-7,3	42,7
	Vår MAM	13,5	0,5	27,8	24,7	0,9	51,0
	Sommer JJA	9,3	-1,4	16,6	17,0	-2,6	30,4
	Høst SON	13,9	-0,8	25,7	25,5	-1,4	47,1
NR-9 Inntrøndelag	År	12,7	1,5	21,9	23,2	2,7	40,1
	Vinter DJF	14,7	-4,1	29,1	27,0	-7,5	53,4
	Vår MAM	13,9	3,5	27,1	25,5	6,4	49,6
	Sommer JJA	9,2	1,3	15,4	16,9	2,4	28,3
	Høst SON	14,5	0,5	24,9	26,5	1,0	45,6
NR-10 Trøndelag/ Helgeland	År	12,3	0,6	28,3	22,5	1,1	51,8
	Vinter DJF	10,1	-6,3	19,9	18,6	-11,6	36,5
	Vår MAM	12,3	3,1	31,3	22,6	5,7	57,4
	Sommer JJA	11,5	4,4	19,7	21,1	8,0	36,1
	Høst SON	15,4	0,5	33,2	28,3	0,9	60,8

I Tabell 3 ser vi relativ økning i antall dager med mye nedbør, samt relativ endring i nedbørsmengde for disse dagene. Nedbørsøkningen for de dagene med mye nedbør ligger i samme størrelsesorden som økningen i årsnedbør, og det kan komme til å bli flere dager med mye nedbør. For Trøndelag kan det forventes en økning på nesten 70 % av disse dagene i året, med noen sesongvariasjoner. Dette er marginalt lavere enn hva som er beregnet som gjennomsnitt for hele Norge. Dette kan være indikasjon på at selv om døgnnedbørsmengden ikke øker veldig mye, vil områder som i dag har kapasitetsproblemer, eller områder som får kapasitetsproblemer på grunn av utbygging og fortetting i fremtiden, oppleve et lavere servicenivå (mer frekvente oversvømmelser) og verre miljøbelastning (mer overløpsutslipp og lengre driftstid på overløpene) gitt denne projiseringen.

⁵ Hanssen-Bauer et al. (2009) differensierte resultatene fra modellene i ensemblet slik at de modellene som presenterte de 10 % laveste resultatene ble karakterisert som "lav", de modellene som presenterte de 10 % høyeste resultatene ble karakterisert som "høy" og resterende modeller ble karakterisert som "medium".

Tabell 3: Relativ endring i dager med mye nedbør⁶ og tilhørende relativ endring i nedbørmengde for to ulike perioder og utvalgte områder i Norge (se Figur 11 for oversikt over nedbørsregionene). Tabellen er avkortet av forfatteren for å vise områdene av spesiell interesse og er hentet fra Hanssen-Bauer et al. (2009).

Region	Sesong	1961–90 til 2071–2100: Endring (%) i antall dager med mye nedbør			1961–90 til 2071–2100: Endring (%) i nedbørmengde på dager med mye nedbør		
		M	L	H	M	L	H
Norge	År	75,7	40,6	139,9	15,6	7,2	23,1
	Vinter DJF	126,5	80,0	250,9	16,5	1,9	32,3
	Vår MAM	88,3	41,6	193,1	15,5	5,9	29,1
	Sommer JJA	71,4	30,0	86,9	16,5	6,4	21,5
	Høst SON	110,3	55,9	192,5	17,5	9,7	26,4
NR-8 Møre og Romsdal	År	70,2	7,1	201,1	13,8	0,6	31,0
	Vinter DJF	76,0	-38,9	176,5	13,4	-11,9	33,6
	Vår MAM	111,0	11,8	269	18	1,8	39,7
	Sommer JJA	78,6	6,9	132,1	18,2	0,4	30,3
	Høst SON	83,1	23,0	213,6	14,4	3,3	34,4
NR-9 Inntrøndelag	År	96,2	21,8	171,7	19,7	6,4	28,7
	Vinter DJF	117,2	-42,4	271,2	15,5	-14,2	38,6
	Vår MAM	132,4	35,0	241,2	20,8	5,6	33,2
	Sommer JJA	110,6	29,3	176,4	25,6	8,1	38,0
	Høst SON	128,8	29,5	230,1	21,4	7,6	35,5
NR-10 Trøndelag/ Helgeland	År	68,6	9,1	183,7	13,9	1,0	32,8
	Vinter DJF	86,5	-43,2	172,9	13,2	-13,6	33,5
	Vår MAM	65,1	7,5	184,6	11,1	1,3	33,0
	Sommer JJA	90,1	17,0	158,1	19,4	3,6	36,6
	Høst SON	92,7	5,7	310,1	13,9	1,1	38,8

3.6.4 Hydrologisk framskrivning for vassdrag i Norge

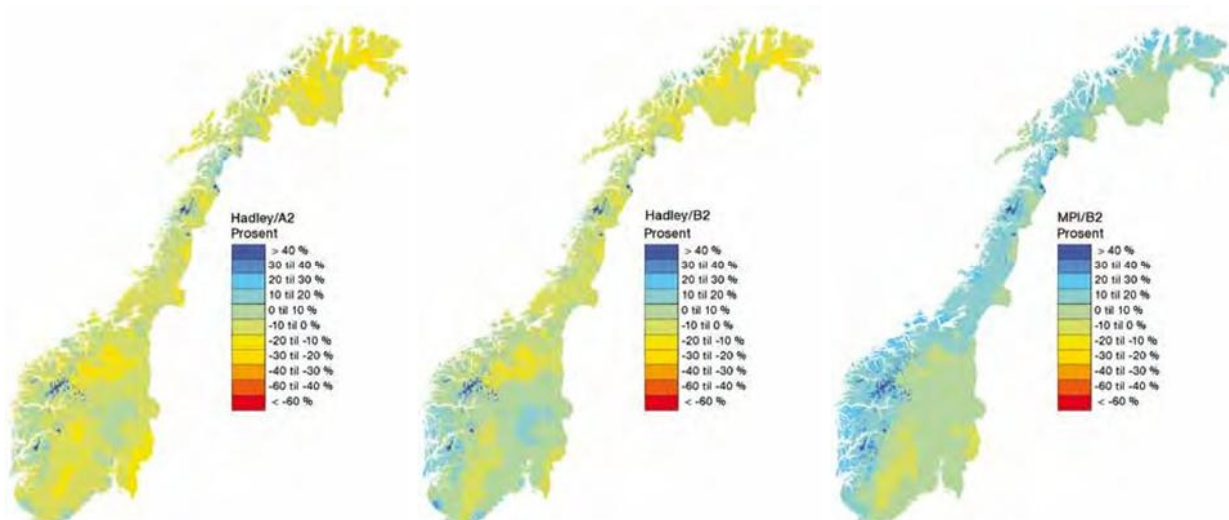
Hydrologiske framskrivninger varierer fra hvilke scenario som ligger til grunn og hvilke modell som er benyttet. Fokus for modelleringen har vært større vassdrag hvor klimaendringenes påvirkning av vannkraftproduksjon har stått sterkt. Roald et al.(2006) benyttet to AOGCMer, ECHAM4 utviklet av Max Planck Instituttet (MPI) i Tyskland og HadAM3H utviklet av Hadley senteret i Storbritannia. For å få mer detaljerte simuleringer for Norge, ble nedskalering med en dynamisk regional modell benyttet. Den spesifikke regionale modellen som ble benyttet var HIRHAM.

I Figur 12 er resultatene fra både MPI-modellen og Hadley-modellen vist. Disse modellene simulerer nedbørsfordelingen i Norge forskjellig, der hvor MPI-modellen simulerte mer nedbør i vest på grunn av forsterket vestavindsbelte og Hadley-modellen simulerte mer nedbør fra sørøst (Hanssen-Bauer et al. 2009).

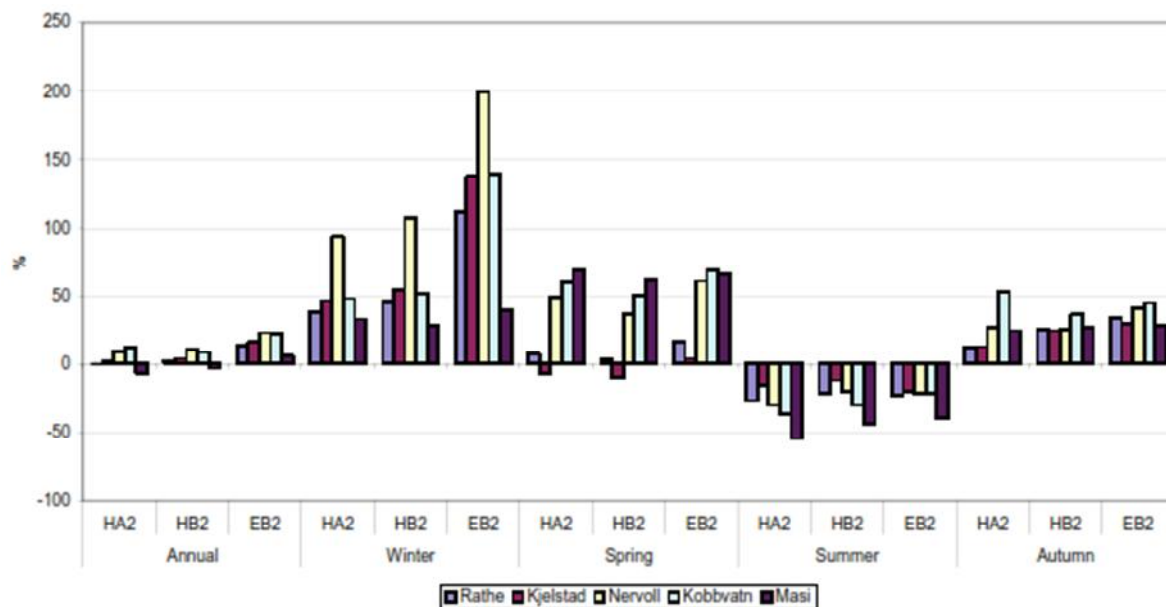
Sjøskogbrekken er lokalisert mellom Gaula i vest og Stjørdalsvassdraget i øst. Disse vassdragene var noen av de Roald et al.(2006) analyserte avrenningen for i et annet klimaregime og resultatene vises i Figur 13. Årlig avrenning for Kjelstad (Trøndelag) er forventet å øke med mellom 5 og 20 % avhengig av modell og scenario. Endret sesongvariasjon følger samme mønster mellom modellene, og det blir forventet mer avrenning om høst, vinter og vår og mindre avrenning om sommeren.

Sjøskogbrekken er et mindre nedbørsfelt som ikke strekker seg over store områder som Gaula (4104 km²) og Stjørdalsvassdraget (2280 km²), hvor begge har landområder i både høyfjellet og i lavlandet. Dette gjør at resultatene må benyttes med forsiktighet for Sjøskogbrekken, som strekker seg over ca. 5,4 km² og befinner seg i lavlandet nær Trondheimsfjorden. Nedbøren er forventet å øke mer i høyfjellet (Hanssen-Bauer et al. 2009).

⁶ Hanssen-Bauer et al. (2009) definerte for denne tabellen at dager med mye nedbør er de dager med nedbørmengder som ble overskredet 0,5 % i normalperioden (1961 – 1990).



Figur 12: Estimert relativ endring i årlig avrenning i Norge fra 1961-1990 til 2071-2100 for Hadley-modellen med scenario A2 og B2 og MPI-modellen med scenario B2 (Hanssen-Bauer et al. 2009).



Figur 13: Relativ årlig endring i årsavrenning og sesongavrenning i Trøndelag og Nord Norge fra 1961-1990 til 2071-2100 for Hadley-modellen med scenario A2 og B2 og MPI-modellen med scenario B2 (Roald et al. 2006).

3.7 Usikkerhet ved klimamodellering

I dette kapittelet har flere usikkerhetsmomenter ved klimamodellering blitt belyst. Hanssen-Bauer et al.(2009) kategoriserte usikkerhet ved klimaprediksjoner inn i fire deler:

1. Naturlige klimavariasjoner
2. Naturlig klimapådriv
3. Menneskeskapt klimapådriv
4. Ufullstendig kunnskap

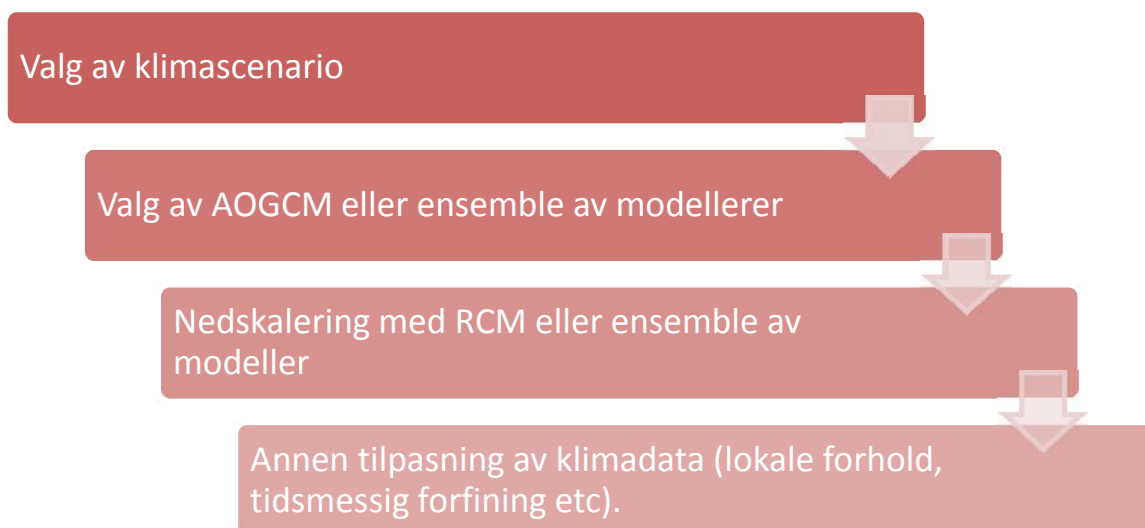
For naturlige klimavariasjoner gjelder fenomener som kan påvirke klimaet på områder av ulik størrelse og over ulik tid. El Niño/La Niña og NAO er slike fenomener, hvor NAO ikke kan forutsees, da prosessene som skaper dette ikke fullt ut er forstått, men NAO er viktig for været i Norge. El Niño/LaNiña, som egentlig er et mål på havtemperatur i Stillehavet, kan forutsees opp til et halvt

år i forveien, og har stor innvirkning på klima over store deler av jorden. Men en AOGCM kan ikke estimere når disse naturlige variasjonene vil skje, men de kan estimere generelle parametere som hyppighet, utstrekning og styrke (Hanssen-Bauer et al. 2009). Lengre frem i tid er det dette som vil være mer interessant å estimere, og behovet for å kunne tidfeste El Niño/La Niña syklusen eksakt i perioden 2071 – 2100 kan antas å være minimalt i dag.

Naturlig klimapådriv gjelder ukontrollerte forhold menneskeheten ikke kan påvirke. Dette kan da være vulkanutslipp og solaktivitet. Å kvantifisere og tidfeste vulkanutslipp, vil være umulig og er dermed en naturlig kilde til usikkerhet ved klima (Hanssen-Bauer et al. 2009).

Menneskeskapt klimapådriv gir fundamentale føringer for klimaendringer, og fører til usikkerhet ved valg av klimascenario. Som beskrevet i kapittel 3.3 vil fremtidige konsentrasjon av klimagasser variere mye mellom scenarioene beskrevet av IPCC, og fremtidig handleevne og tilpasningsvilje kan antas å ha stor betydning for hvordan klimaendringene vil utarte seg. Disse er per definisjon like usikre (Nakicenovic et al. 2000), og dette er tydelig da det er umulig å forutsi sosial og økonomisk utvikling, samt teknologiske gjennombrudd.

Klimamodeller som AOGCM vil arve usikkerheten rundt utslippsscenarioene, samtidig som enhver klimamodell vil introdusere flere kilder til usikkerhet uavhengig av inndataene. Usikkerhet angående tilbakekobling, altså klimasystemets indre prosessers reaksjon på ytre pådriv, er en av hovedkildene til usikkerhet knyttet til dagens klimamodeller (Iversen et al. 2005). Modellene er basert på forenklinger av de fysiske prosessene som utgjør klimasystemet, og viktige prosesser kan kun simuleres ved en tilnærming innenfor den romlige oppdelingen (Roald et al. 2006). Modellene er da preget av “ufullstendig kunnskap” som er fjerde punktet til Hanssen-Bauer et al.(2009) sin liste over usikkerhet tilknyttet klimamodellering. Det er blant annet knyttet stor usikkerhet til biomassens fremtidige evne til å ta opp CO₂ og smelting av permafrost, som er antatt å gi utslipp av metan og karbondioksid. Disse prosessene er ikke inkludert i AOGCM.



Figur 14: Illustrasjon av hvordan effekter av klimaendringer kan analyseres for mindre lokale forhold. Usikkerhet er antatt å øke etter som man prøver å analysere mer lokale effekter, kontra globale effekter, som ikke er utsatt for den samme “arvede kjeden” av usikkerhet eller har det samme behovet for lokal beskrivelse av prosessene.

Siden modellresultatene varierer mellom ulike klimamodeller, så vil det bli introdusert mye usikkerhet ved valg av en modell. En mulig løsning på dette er da at i en beslutningsammenheng

baserer man seg på resultatene fra flere modeller med forskjellig angrepsmåte. Gjennomsnittlige resultater fra modeller gir bedre resultater fra modellsimuleringer enn fra kun en enkelt modell. På denne måten kan da usikkerheten introdusert med modellvalg forminskes noe (Hanssen-Bauer et al. 2009).

Nedskalering ved bruk av RCM vil arve usikkerhet fra AOGCM. Samtidig vil RCM også være en tilnærming til fysiske prosesser, og innenfor den romlige oppdelingen vil det fortsatt være gjennomsnittlige forenklinger av parametere som beskriver f. eks topografi. (Roald et al. 2006) poengterte også at RCM er preget av forventingskjevhet angående f. eks nedbørsmengder, hvor RCM har tendenser til å overestimere nedbør ved kontrollkjøringer og sammenligning av observerte data. RCM produserer også større spredning i resultatene enn AOGCM (Hanssen-Bauer et al. 2009).

De fundamentale egenskaper til klimaet gjør det utfordrende å beskrive dets stokastiske oppførsel i en modell og dette forverres når resultatkravet øker. Påvirkning av lokale små nedbørfelt har et høyt krav til data, det skal være tilpasset lokale forhold og tidssteg skal være korte for å samsvare med raskt reagerende dynamikk i små felter. Urbane hydrologiske modeller stiller da de høyeste kravene til data, som ikke kan leveres av en RCM enda. Data som da skal benyttes for en klimautredning for urbane nedbørfelt vil da måtte gå igjennom prosessen beskrevet i Figur 14 og vil da være en klimaanalyse med veldig høy grad av usikkerhet.

3.8 Oppsummering

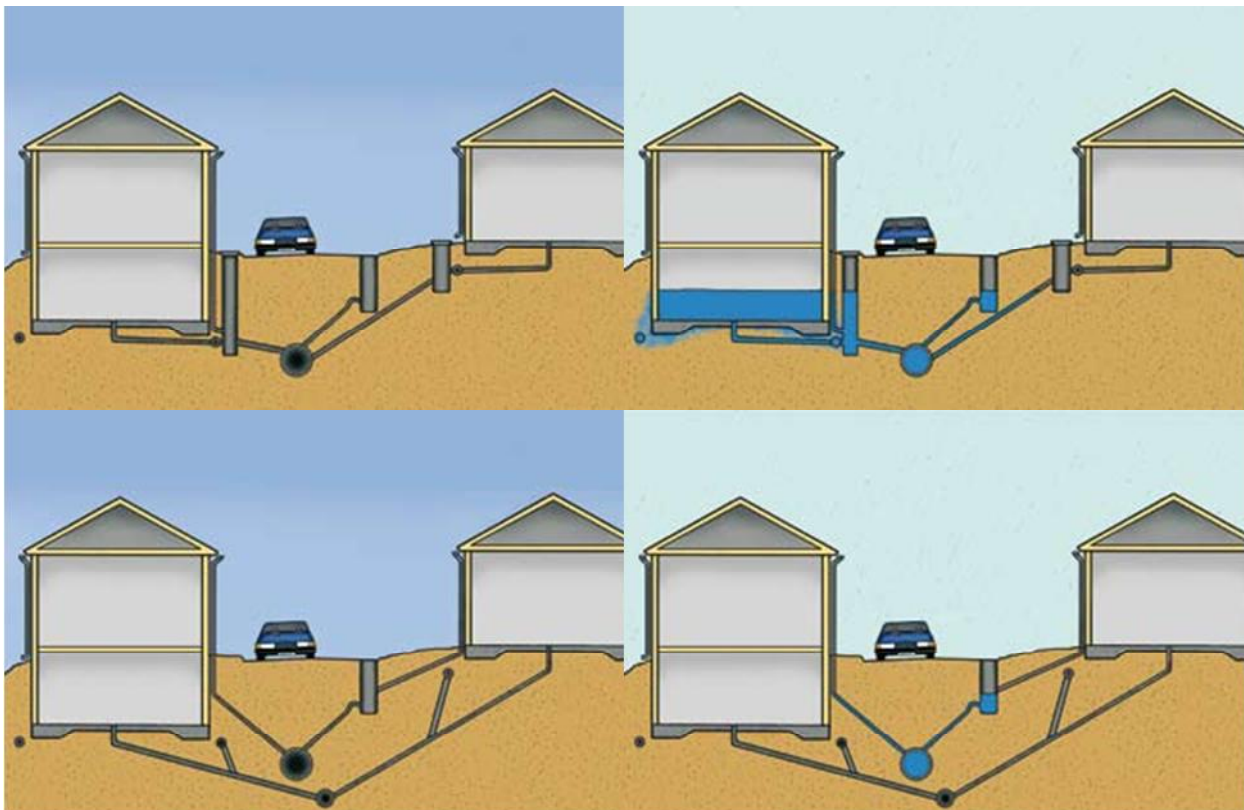
Klimaet er et fenomen som er stedsbetiget, men vilkårlig i oppførsel. Komplekse prosesser gjør at ved klimamodellering ikke er en fullt ut forstått system, og den numeriske oppdelingen må være definert slik at løsninger gis innen ønsket tid på tilgjengelig datamaskinvare. Resultatene fra klimamodeller kommer i en oppløsning som er for grov til bruk i avløpssammenheng, men det er blitt utviklet metoder for å benytte resultatdata fra klimamodeller på nedbørsserier som er bedre egnet som designgrunnlag for urbane avløpssystemer.

4 Kommunen

4.1 Avløpssystemet

Det urbane avløpssystemet har som hovedformål å beskytte menneskers liv, helse og verdier, samt å ivareta en tilfredsstillende miljømessig håndtering av vannet. Systemet består av ulike deler med hver sin funksjon. Hovedfunksjonen er å samle opp, lede bort og behandle vannmengdene slik at tilfredsstillende kvalitet oppnås, før det ledes til resipient. Vannet som ledes bort har forskjellig opphav, der hvor store volumer består av regnvann fra tak, vei, parkeringsplass etc. og innlekking av grunnvann i utette rør. Annet vann er spillvann fra boliger, hvor akseptabel behandling har stor betydning for miljø og helse (Bøyum & Thorolfsson 2001).

Avhengig av kildesorteringen av vannet kan det tradisjonelle avløpssystemet deles i to hovedsystemer (Bøyum & Thorolfsson 2001). Det første systemet er fellessystemet, som er et enkelt system der hvor vannet blir ført til ett rørsystem uavhengig opprinnelse og vannkvalitet. Dette systemet har den fordelen at det er av enklere struktur, og overvann fra byområder blir rensset med samme prosess som spillvannet. Dette kan være fordelaktig når overvannet er forurenset (Bøyum & Thorolfsson 2001).

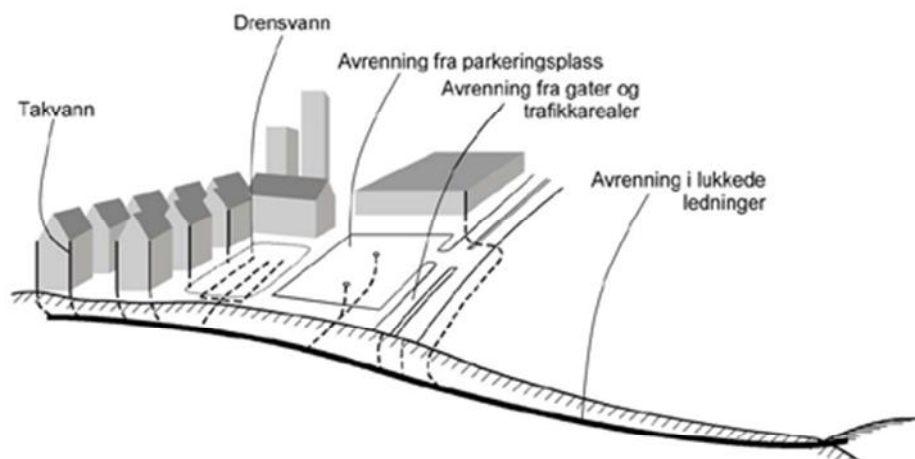


Figur 15: Illustrasjon av de to konvensjonelle hovedtypene for urban behandling av vann hentet fra Svensk Vatten (2007). Øverste bildene viser konseptet for fellessystemet og nederste bildene for separatsystemet.

Overvannet kan inneholde forurensningsstoffer som det ikke er ønskelig å slippe ut i en resipient, men ulempene med fellessystemet er på den annen side mange. Fellessystemet kan føre til vanskeligere renseforhold i renseanlegget, da konsentrasjonen av forurensende stoffer i spillvannet blir tyttet ut av overvannet. Ved regnvær eller snøsmelting kan avrenningen nå maksimal kapasitet til transport- og behandlingsanlegget. Dette introduserer behovet for nødoverløp eller fordrøyningsbasseng, som skal gi hydraulisk kontroll og beskytte anlegget nedstrøms og oppstrøms

for overbelastning. Avhengig av hvilken type nødoverløp, vil da avløpsvann i mer eller mindre nedkonsentrert grad ledes til aktuell resipient når værtilstanden og belastning krever det. Ved kjelleroversvømmelse etc. kan vann fra fellessystemet føre til store skader, og tall fra forsikringsbransjen har anslått at for Norge i perioden 1992 til 2007 har forsikringsutbetalingene vært ca. 5 milliarder kroner (Lindholm et al. 2009). Dette gjelder skader hvor vann trenger inn i boligen og kjelleroversvømmelser kan antas å utgjøre en betydelig sum. I følge Miljøstyrelsen (2007) har den økte sykdomsrisikoen ved at mennesker blir eksponert for fekal forurenset vann (kan inneholde sykdomsfremkallende virus, bakterier og parasitter) en gitt kostnad for samfunnet, så usikret menneskelig kontakt med spillvann bør unngås.

Neste type avløpsanlegg kalles separatsystemet, der hvor det er mulighet til å lede vannet til to uavhengige rørsystemer, avhengig av vannkvalitet. Spillvann og eventuelt overvann som er antatt å være forurenset ledes da til behandlingsanlegg som for fellessystemet. Forskjellen ligger i at store deler av overvannet ledes til et eget overvannsnett, som fører vannmassene til egnet resipient. Fordelene med separatsystemet er flere. Mindre vann videreføres til renseanlegg og det kan da oppnås bedre rensing på det vannet som faktisk er av dårlig kvalitet. Spillvann vil være skjermet for overvannets varierende volumstrøm og skal da ikke gå i overløp til resipient sammen med overvannet ved regnhendelser.

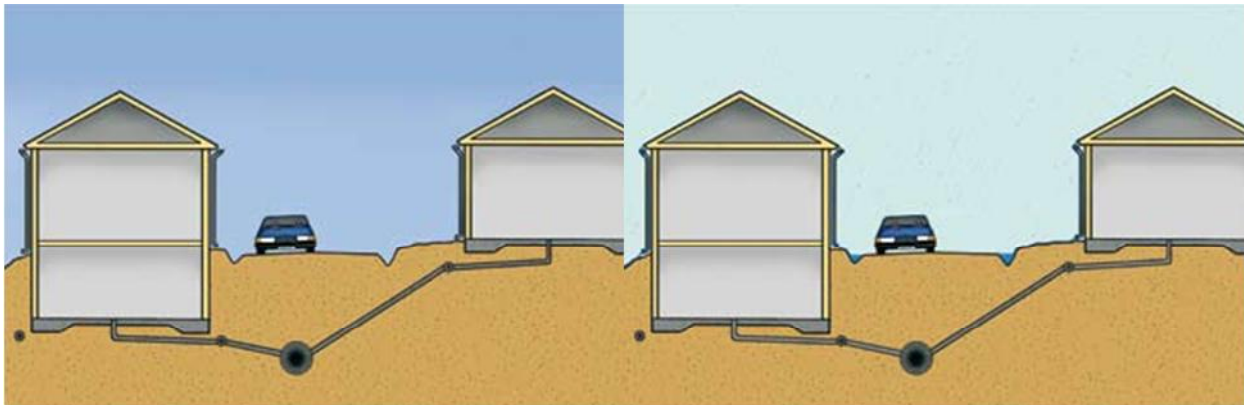


Figur 16: Illustrasjon av konvensjonelt VA-anlegg hvor vannet fraktes vekk i lukkede ledninger (Lindholm et al. 2008).

Oversvømmelse med kun overvann kan dessuten gi en enklere håndterbar oversvømmelse i kjeller, men det er antatt av minimal betydning for skadeomfanget på bygningsmasse, da få kjellere er helt tette og oppstuvning rundt grunnmur kan føre til inntrengning av vann i kjeller (Lindholm et al. 2008). Ulempene ved separatsystemet er at det er dyrere i anskaffelse og har behov for større grøftevolum. Det er mer komplisert i utforming enn fellessystemet, og en uheldig effekt av dette er at risikoen for feilkoblinger øker. Dette kan føre til en uønsket blanding av spillvann og overvann.

Bøyum og Thorolfsson (2001) har i sin lærebok også nevnt et tredje mulig system, der det er et separatsystem hvor alt overvann behandles med naturlige vannveier. Dette virker for forfatteren

som et system basert på LOD⁷-tiltak, hvor LOD-tiltakene tar hånd om all overvannsavrenning på en naturlig hydrologisk måte.



Figur 17: Illustrasjon hvor overvann behandles med naturlige vannveier. Illustrasjonen er hentet fra Svensk Vatten (2007).

For å øke utbyggbart areal nær bysentrum, har flere små vassdrag blitt lagt i kulverter. Dette betyr at flere bekker har blitt del av avløpssystemet og avrenningen i bekker for Norge kan for store deler av året antas å øke som beskrevet i kapittel 3.6.3. Bekkelukkinger er dessuten i konflikt med EUs rammedirektiv for vann og kan sees på som en total fjernelse av en biotop. Kulvertene har dessuten en enklere hydraulisk utforming, der hvor det ikke gis mulighet til lokale oversvømmelser, slik som skjer i bekkens nærområde ved små oversvømmelser, og dette resulterer i at oversvømmelsene kan flyttes enten oppstrøms eller nedstrøms kulverten. Vedlikehold av kulverter er dessuten en utfordring både teknisk, men også økonomisk, da det virker som en faglig konsensus at det blir for kostbart.

Det konvensjonelle avløpssystemet er en viktig del av infrastrukturen i et land, som beskytter mennesker og miljø, men det har flere negative momenter. Dette har invitert til tankegang rundt lokal overvannshåndtering som er beskrevet i kapittel 4.2. Konvensjonelle overvannssystemer har i flere tilfeller resultert i:

- Mer kostbare avløpssystemer enn hva som er nødvendig.
- Utslipp og spredning av forurensende avfallsstoffer ved blant annet overløp og lekkasjer.
- Grunnvannsstanden har blitt lavere.
- Bortfall av naturlige biotoper og renseprosesser.

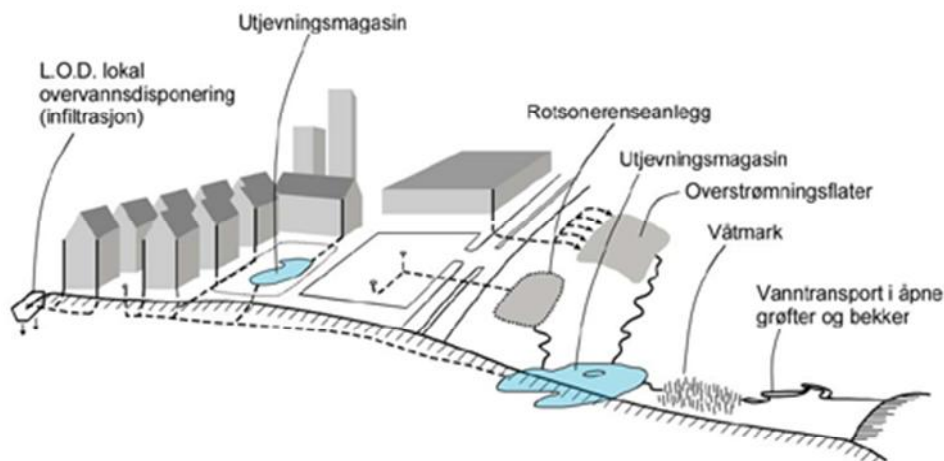
4.2 Lokal overvannshåndtering

Både fellessystemet og separatsystemet kan få utfordringer ved økte nedbørsmengder ved fremtidig klimaendring. En metode som kan benytte overvannet som en ressurs og samtidig ta hensyn til økt kapasitetsbehov ved klimaendringer kalles lokal overvannsdistribusjon (LOD). Dette deler mye av den samme tankegangen som LID (Low Impact Development) og BMP (Best Management Practices) fra utlandet. Ved disse metodene er det ønskelig å endre vannets vei i urbane nedbørfelt, som er preget av tette flater og rask avrenning, til en mer naturlig vei for vannet. Dette kan da være å fremme infiltrasjon og benytte åpne vannveier og dammer. LOD kan da inngå i en helhetlig overvannshåndtering, der hvor visjonene ifølge Lindholm et al.(2008) kan oppsummeres i:

⁷ LOD er et akronym for lokal overvannshåndtering.

- Forebygge skader og ulemper på liv, helse og miljø.
- Benytte potensialet i overvann av tilfredsstillende kvalitet som en ressurs i landskapet.
- Være en biotop og styrke det biologiske mangfoldet.

Lokal overvannshåndtering er en del av det totale avløpssystemet, men anvendelsen og mulighetene ved LOD er brede og baserer seg på teknologi som simulerer naturlige prosesser. I Figur 18 er det illustrert implementering av LOD-tiltak i by. Av figuren er det vist hvordan tiltakene øker infiltrasjonskapasitet og nedbørfeltets evne til å holde tilbake vannmasser lokalt med ulike typer tiltak som fungerer som utjevningssmagasin. Samtidig vil enkelte LOD-tiltak ha rensende effekt på vannmassene (Lindholm et al. 2008).

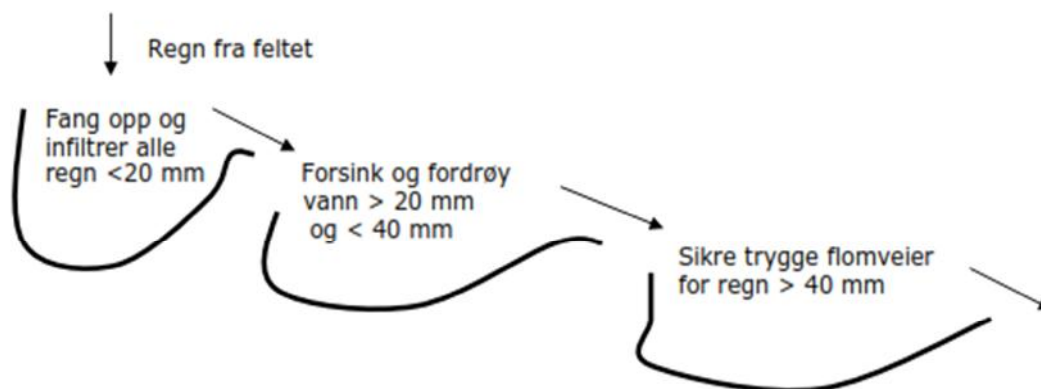


Figur 18: Illustrasjon av LOD-tiltak i by (Lindholm et al. 2008).

I ExFlood-prosjektet vil typiske LOD-tiltak egne seg oppstrøms urbane områder for å minske maksimal avrenning inn i det urbane området. Disse tiltakene vil også være aktuelle metoder mot erosjon og utvasking av næringsstoffer i jordbruksjord. LOD-tiltakene kan grovt sett deles inn i tre grupper etter en trestegs strategi for overvannshåndtering, men ett tiltak vil kunne ha flere funksjoner som plasserer det i flere av gruppene.

1. Infiltrere små nedbørmengder.
2. Forsinke og tilbakeholde mellomstore nedbørmengder.
3. Sikre trygg bortledning av store nedbørmengder på overflaten.

Nedbørmengdene som definerer hvilken metode som benyttes må bli avgjort av lokale forhold (Lindholm et al. 2008). I Figur 19 må nedbørmengdene for infiltrasjon, forsinkelse og sikring av flomveier vurderes etter lokale forhold, da f. eks infiltrasjonskapasitet avhenger av grunnforhold, årstid og metning i jorda (Tollan 2002).



Figur 19: Illustrasjon av trestegs strategi hvor tallene kun er eksempler(Lindholm et al. 2008).

Det finnes en rekke LOD-tiltak, og viktige systemer er konstruerte våtmarker, infiltrasjonsbasseng, infiltrasjonsgrøft, dam og permeabelt dekke. Disse tiltakene vil ha en direkte innvirking på vannbalansen i ethvert system, men de introduserer også renskapasitet for vannet. I Tabell 4 listes renseseffekt for flere forurensingsparametere for ulike LOD-tiltak.

Tabell 4: Estimering av renseseffekter i prosent for ulike LOD-tiltak (Lindholm et al. 2008).

Type LOD-anlegg	Parameter						Total virkningsgrad
	Partikulært materiale	P	N	BOF	Metaller	Bakterier	
Liten "våt" dam uten fordrøyning	60 - 80	40 - 60	20 - 40	20 - 40	20 - 40	Ukjent	God
Stor "våt" dam uten fordrøyning	80 - 100	60 - 80	40 - 60	40 - 60	60 - 80	Ukjent	Høy
"Tørr" dam	30 - 75	10 - 60	10 - 60	20 - 60	30 - 90	50 - 90	God
"Våt" dam, oppholdstid 9 timer	60 - 80	20 - 40	20 - 40	20 - 40	40 - 60	Ukjent	God
"Våt" dam, oppholdstid 24 timer	80 - 100	40 - 60	20 - 40	40 - 60	60 - 80	Ukjent	God
"Våt" dam, oppholdstid 24 timer etterfulgt av våtmark	80 - 100	60 - 80	40 - 60	40 - 60	60 - 80	Ukjent	Høy
Lukkede magasiner	0	0	0	0	0	0	
Infiltrasjon fra terreng, gresskledd stripe med bredde 6m	20 - 40	0 - 20	0 - 20	0 - 20	20 - 40	Ukjent	Høy
Infiltrasjon fra terreng, stripe med skogs- vegetasjon, bredde 30m	80 - 100	40 - 60	40 - 60	0 - 20	80 - 100	Ukjent	God
Infiltrasjon fra åpne gresskledd grøfter	20 - 40	20 - 40	20 - 40	20 - 40	0 - 20	Ukjent	Lav
Infiltrasjonsdammer	80 - 100	60 - 80	60 - 80	80 - 100	80 - 100	80 - 100	Høy
Infiltrasjon gjennom porøs overflatebelegning	80 - 100	60 - 80	60 - 80	80 - 100	80 - 100	80 - 100	Høy
Lukkede infiltrasjonsgrøfter	80 - 100	60 - 80	60 - 80	80 - 100	80 - 100	80 - 100	Høy

4.3 Dimensjonerende normer

Ved overbelastning av forskjellig avløpssystemer kan det forårsake ubehag for befolkningen, forurensing, flomskader og sikkerhetsrisiko. Dette henger sammen med dimensjoneringsnivået, som infrastrukturen blir bygget etter. Det er begrensede ressurser til konstruksjon og drift av slike prosjekter, så ethvert anlegg har en betinget sannsynlighet for funksjonssvikt og blir definert ut ifra dimensjonerende gjentaksintervall. Faktorene som bestemmer dimensjonerende gjentaksintervall kan da være betydningen av strukturen, kostnad, og konsekvenser ved funksjonssvikt. Økonomisk optimalt ville det da ha vært å basere gjentaksintervallet på en kost-nytte analyse, men i praksis er det vanlig at gjeldende dimensjonerende normer benyttes for hvert prosjekt (Akan & Houghtalen 2003).

Tabell 5: Dimensjonerende gjentaksintervall etter Norsk Standard NS-EN 752 1997 (Lindholm et al. 2008).

* Oppstuvning til topp rør.

** Oppstuvning til kjeller- eller marknivå.

Dimensjonerende regnskyllhyppighet (gjentaksintervall i løpet av n år)*	Plassering	Dimensjonerende oversvømmelseshyppighet (gjentaksintervall i løpet av n år)**
1 år	Landbruksområder	10 år
2 år	Boligområder	20 år
2 år	Bysenter/industriområder/forretningsstrøk -med oversvømmelseskontroll -uten oversvømmelseskontroll	30 år
5 år		30 år
10 år	Undergrunnsbaner/underganger	50 år

Tabell 6: Retningslinjer for dimensjonerende gjentaksintervall for separat- og fellesavløpssystem fra Norsk Vann (Lindholm et al. 2008).

Dimensjonerende regnskyllhyppighet (gjentaksintervall i løpet av n år)	Områdetype	Dimensjonerende oversvømmelseshyppighet (gjentaksintervall i løpet av n år)
5 år	Ubebygde område	10 år
10 år 20 år	Boligområde Åpent Lukket	20 år
		30 år
20 år 30 år	By/sentrumsområde Åpent Lukket	30 år
		50 år

Ved bygging av vei skal drencsystemet dimensjoneres slik at veganlegget er funksjonsdyktig under aktuelle vær- og klimaforhold. Drencsystemet har flere funksjoner og skal blant annet (Vegdirektoratet 2011):

- Sikre bæreevne
- Sikre avrenning fra kjørebane og veiskulder
- Beskytte mot oversvømmelse
- Hindre ras, utglidning, erosjon som følge av overflatevann eller vann i grunnen

Av funksjonskravene fra Vegdirektoratet, kan vi se at dreneringssystemet for vei har lignende funksjonskrav for kommunale avløpsanlegg. Begge systemene skal beskytte annen infrastruktur mot skader påført av vann. I Tabell 7 ser vi retningslinjer for dimensjonerende gjentaksintervall for vei, og det er tydelig at funksjonen til veg har et høyere sikkerhetsnivå enn for vanlige VA-systemer. Dette kan være et resultat av både historisk ingeniørpraksis og at veisikkerhet er vesentlig viktig for å hindre tap av menneskeliv i trafikken. I en kost-nytte analyse vil risiko for tap av menneskeliv økonomisk forsvare større investeringskostnader og dermed lengre gjentaksintervaller.

Tabell 7: Dimensjonerende gjentaksintervall ved drenering av vei (Vegdirektoratet 2011).

* I områder der hvor overvann fra vei skal tilknyttes kommunale overvannssystemer, skal kommunale dimensjoneringsregler følges.

** Ved endring av vassdrag skal NVE kontaktes.

Veg- /dreneringselement	Valg av returperiode for nedbør*	
	Veg med omkjøringsmulighet	Veg uten omkjøringsmulighet
Rister, sluk, overvannsledning, terrenggrøfter – LANGS VEIEN	50 år	100 år
Kulvert, innløp, utløp, nedføringsrenne – PÅ TVERS AV VEIEN	100 år	200 år
Sikring av nye eller justerte elve- eller bekkeløp**	100 år	200 år

4.4 Trondheim kommunes VA-Norm om overvann

I følge Trondheim kommunes VA-Norm skal det ved dimensjonering av overvanns- og fellessystem ta hensyn til forhold som kan endre fremtidig avrenning. To av endringene kommer av fortetting og utvidelse av avløpsnett og en kommer av antatt økning i nedbørsmengder på grunn av klimaendringene (Trondheim-Kommune 2008).

Videre presiserer VA-Normen at det ved planlegging og prosjektering skal risiko og konsekvens av hendelser som overstiger dimensjonerende avrenning alltid vurderes (Trondheim-Kommune 2008). Dette vil si at normen gir et krav om at sannsynlighet og effekt av ekstreme hendelser skal vurderes.

Dimensjonerende regnskyllshyppighet og oversvømmelseshyppighet er avhengig av områdetype. Dimensjonerende regnskyllshyppighet benyttes for områder der konsekvens av oversvømmelse er lav og er definert som det regnskyll som fører til fullt rør. Hvis oversvømmelse av områdene medfører store konsekvenser, skal dimensjonerende oversvømmelseshyppighet være avgjørende, og det er definert som oppstuvning i rør og kum til mark-, gate- og kjellernivå.

Tabell 8 viser oversikt over dimensjonerende hendelser for infrastrukturen, og opplyste verdier er oppgitt som minimumsverdier. Er det billig å dimensjonere for høyere gjentaksintervall eller ved stort skadepotensial skal høyere gjentaksintervall benyttes (Trondheim-Kommune 2008), men det sies ikke noe om hvilken økonomisk analyse dette valget skal baseres på, men antakelig så kan en netto nåverdi beregning benyttes sammen med en kvalitativ vurdering av hvilken risiko man ønsker å leve med.

Tabell 8: Dimensjonerende gjentaksintervall i VA – Normen til Trondheim Kommune (Trondheim-Kommune 2008).

Dimensjonerende regnskylhyppighet (gjentaksintervall i løpet av n år)	Områdetype	Dimensjonerende oversvømmelseshyppighet (gjentaksintervall i løpet av n år)
2 år	Ubebygde område	10 år
10 år	Boligområde	20 år
20 år	Åpent Lukket	30 år
20 år	By/sentrumsområde	30 år
30 år	Åpent Lukket	50 år

For å finne dimensjonerende vannmengder er størrelsen og kompleksiteten på delfeltene avgjørende. På de minste og enkleste feltene (homogene og mindre enn 50ha) kan den rasjonelle metode benyttes. Er feltene kompliserte og sammensatte kan tid-arealmetoden eller summasjonskurvemetoden benyttes. Ved større felter eller der konsekvenser av feildimensjonering er store blir det satt krav til at hydrauliske datamodeller blir benyttet (Trondheim-Kommune 2008).

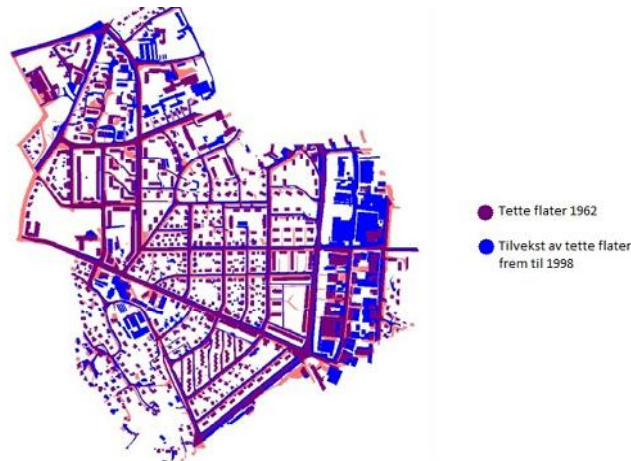
Sikkerhetsfaktoren som benyttes ved utregningene er satt til 1,2 og legges på historiske nedbørsdata. Dette er da et tiltak for å ta høyde for fremtidige klimautviklinger alene, og det tas ikke hensyn til usikkerhet i andre parametere som inngår i en beregning, men VA-normen omtaler hvordan tilknyttet areal, avrenningskoeffisient og konsentrasjonstid kan fastsettes sikrere.

4.5 Fortetting og endret arealbruk i nedbørsfeltet

Befolkningsøkning i byene og sentrale regioner vil skje med fortetting, og urbaniseringsgraden vil øke. Dette medfører større andel tette flater i nedbørsfeltet. Dette kommer av at areal i området blir bygd ut med bygninger, veier og parkeringsplasser. For sentrale områder vil da vannet i mindre grad bli forsinket i vegetasjonsområder eller naturlige små dammer, og sammen med de tette flatene kan dette føre til høyere maksimal avrenning, som vil øke belastningen på det eksisterende avløpsanlegget (Lindholm et al. 2007).

Urbanisering vil øke risikoen for oversvømmelse og styrket planlegging og streng reguleringsplan vil spille en viktig rolle for å formilde effekten av flere bygninger og høyere befolkningstetthet (Evans et al. 2004).

Figur 20 er endringen i tette overflater vist for en bydel i Kristiansund. En økning av tette flater som fører til rask avrenning vil utvilsomt føre til mer belastning på VA-infrastrukturen og effektene av en økning i fortettingen burde utredes på samme måte som klimaendringer, da begge faktorer påvirker blant annet maksimal belastning i ledningsnett.



Figur 20: Illustrasjon som viser fortettingen i bydelen Lund i Kristiansand har endret seg siden 1962 og frem til 1998 (NORVAR 2004). Illustrasjonen er hentet fra (Lindholm et al. 2007) og er noe endret av forfatteren.

Det er ikke bare tette flater som påvirker responsen i nedbørsfeltet. Terrengutjevning, trehogst, jordarbeid og jordkompresjon vil også kunne øke avrenningen fra aktuelle områder (Akan & Houghtalen 2003).

I følge Dingman (2002) vil endret arealbruk og antropologiske utslipp kunne påvirke lokalt og regionalt nedbør. Endringer av landoverflaten endrer forholdene for fordampning, og urbane områder avgir mer varme og støv, som kan brukes som kondensasjonskjerner. Dette er tilfelle for flere amerikanske urbane områder. Nedbøren ble endret og førte til større avrenning i elver og kloakksystemer.

En annen negativ effekt av fortetting er at menneskelig aktivitet forårsaker akkumulering av forurensing i urbane områder. Dette utgjør diffuse forureningskilder, og Akan & Houghtalen (2003) skrev at slik diffus forurensing er hovedårsaken til forringelse av resipienter.

4.6 Finansiering av VA-sektoren

Finansieringen av VA-sektoren er hjemlet i lov om kommunale vass- og kloakkavgifter av 31. mai 1974 og rammeforskrift av 10. januar 1995 med senere endringer. Denne loven og forskriften har da som utgangspunkt at brukerne (boligeierne) bør bære kostnaden for tjenestene sektoren tilbyr. Vann og avløp har da et lovkrav om at selvkost er øvre grense for abonnentens betaling, men subsidiering er tillatt (KRD 2003).

Definisjon av selvkost: "Selvkost er den merkostnad kommunen påføres ved å produsere en bestemt vare eller tjeneste" (KRD 2003).

For å sikre at prisene ikke settes høyere enn kostnadene for å produsere de spesifikke tjenestene, må kostnadene dokumenteres. Analysenivået ved kalkylene av selvkost bør dessuten samsvare med kostnadsnivået det er snakk om. Ressursene bør brukes for å sikre de største og dermed viktigste utgiftspostene for innbyggerne. En metode for å kontrollere kostnadsnivået vil være å føre et selvkostregnskap for VA-sektoren (KRD 2003).

Driftskostnader og støttefunksjoner for VA-sektoren kan føres på VA-gebyrene, og det eksisterer et eget regelsett og kalkylemetoder i samsvar med god regnskapsskikk, som skal kvalitetssikre at VA-

gebyrene ikke finansierer andre tjenester i kommunen (KRD 2003). Videre omtalelse av disse metodene vil ikke finnes sted i denne oppgaven, men kan leses i KRD (2003).

Investeringer i VA-prosjekter med lang levetid (litteraturen snakker om at VA-anlegg har en antatt levetid på 100 år og skal dimensjoneres deretter) har i flere kommuner blitt direkte finansiert av gebyrinntekter (KRD 2003). Dette samsvarer ikke med prinsipper om tidsriktighet og kostnadsriktighet som selvkostprinsippet bygger på. Vann og avløpsgebyrer skal da kalkuleres etter anleggets økonomiske levetid⁸ med en satt kalkulasjonsrente, og ikke finansielle utgifter (KRD 2003). Med dette sier retningslinjene at investeringer i VA-sektoren skal gebyrdekkes etter finansielle prinsipper, uavhengig av hvordan tiltakene er finansiert.

Retningslinjene sier hvilken kalkylerente som skal benyttes, og låser den til norske statsobligasjoner med tre års gjenstående levetid med et tillegg på 1 %. Dette gjøres for å sikre at kommunene skal kunne dekke utbetalingene ved lånefinansiering av investeringer, samt at det er et sterkt incitament for å velge konkurransedyktige finansieringsløsninger (KRD 2003).

VA-anlegg antas å ha en teknisk levetid på 100 år, men det er stor usikkerhet i denne varigheten, da hydrologiske belastninger er forventet å endres (se f. eks kapittel 3.6.3). Klimaendringer kan dessuten føre til høyere slitasje på VA-infrastrukturen (Lindholm et al. 2007). Samtidig vil fremtidens beslutningstakere ha et annet og bedre beslutningsgrunnlag for når det er optimalt å bytte ut avløpssystemet, da de vil erfare om systemet har et tilfredsstillende funksjonsnivå. Det er da rimelig å anta at både klima, utbygging, lovverk og god ingeniørpraksis vil kunne endres, slik at beslutningsgrunnlaget også endres i fremtiden. Dette gjør at det også er knyttet mye usikkerhet til økonomisk levetid til investeringer i VA-anlegg. Årlige gebyrer blir da regnet ut etter lineære avskrivninger for VA-systemet og det er da et kompromiss for usikkerhet angående økonomisk levetid (reinvesteringpunktet), samt at aktiviteten i VA-sektoren er en kontinuerlig prosess i form av investeringer og produksjon av tjenester (KRD 2003). Retningslinjene anbefaler at økonomisk levetid avgjøres sjablongmessig, men det tar ikke bort den aktuelle usikkerheten ved reell økonomisk levetid.

En konsekvens av selvkostprinsippet er at en eventuell utsettelse av utgifter, som kan skyldes f. eks etterslep på vedlikehold og investeringer, til senere generasjoner ikke samsvarer med selvkostprinsippet. KRD (2003) poengterer at ved et selvkostprinsipp skal ikke gebyrene subsidiere kostnader for fremtidige generasjoner. Samme argument bør da gjelde for at fremtidige generasjoner ikke skal behøve å betale for tidligere mangelfullt vedlikehold eller investeringsvillighet etter et prinsipp om likhet. Selvkostprinsippet kan med denne slutningen være med på å sikre bærekraftig utvikling.

Dette delkapittelet har tatt for seg hvordan selvkostprinsippet skal dekke investeringskostnader og driftskostnader i VA-sektoren. Løpende finansielle kostnader ved sektoren er da førende for aktuelle investeringers bidrag til gebyrene, hvor effektiv finansiering sikres i regelverket. En kommunal beslutningssituasjon før investering, burde inneholde samfunnsøkonomiske vurderinger, og det er dette neste kapittel handler om.

⁸ Økonomisk levetid kan være betydelig kortere enn teknisk mulig brukstid, da teknisk utvikling og forandringer i markedet (eller det generelle beslutningsgrunnlaget) kan gjøre en utskiftning eller oppgradering lønnsomt (SNL 2011). Forventet kontantstrøm (erstatningsutbetalinger) kan endres i VA-sektoren, slik at en reinvestering (eller oppgradering) kan bli lønnsomt på et ukjent tidspunkt i fremtiden.

4.7 Samfunnsøkonomi

Klimaendringer vil på flere måter føre til større risiko for enkeltpersoner og samfunnet generelt. Antall skadetilfeller rapportert til forsikringsselskapene gjelder for flere tusen registrerte skadetilfeller og disse koster forsikringsbransjen opp til flere hundre millioner kroner per år (FNH 2009). Økte nedbørsmengder og mer intens nedbør vil gjøre det vanskeligere å opprettholde trygghet og tilfredsstillende beredskap på samme nivå. Dette dreier seg da om å opprettholde et trygt og robust samfunn, og for sikkerheten i samfunnet handler dette om å ivareta viktige funksjoner og aktiviteter (Leiar et al. 2010). For VA-anleggene vil dette da fokuseres rundt opprettholdelse av et gitt servicenivå i forhold til blant annet kjelleroversvømmelser og forurensing, samt drenering og beskyttelse av infrastruktur som vei, undergang, bane etc.

Svikt i avløpshåndteringen kan få alvorlige konsekvenser for helse og miljø, og det er for samfunnets beste at vann og avløpssektoren gjør tilpasninger i henhold til klimaendringene (Leiar et al. 2010).

RIF (2010) har vurdert tilstanden til infrastruktur i Norge, hvor hver kategori av infrastrukturen ble tildelt en karakter fra en til fem⁹. I denne rapporten var vannforsyningsanlegg og avløp egne kategorier hvor de fikk henholdsvis karakter tre og to. For avløp, forverres situasjonen, og for å sikre kategori fire i dag, krever det investeringer i vann og avløp på ca. 110 milliarder NOK. VA-bransjen er i dag selvfinansierende, men rapporten fra RIF legger vekt på at lokalpolitiske forhold gjør at det er politisk motstand mot å øke gebyrene slik at de samsvarer med land det er naturlig å sammenligne Norge med. Altså vil det i en beslutningssammenheng måtte tas hensyn til både innbyggernes tilfredshet for lave tilkoblingsavgifter og lave gebyrer, og politikerne kan påvirke VA-sektoren til å bli et politisk redskap til å fremme nybygging og befolkningsvekst i kommunen. Dette kan føre til ulønnsomme samfunnsøkonomiske beslutninger og forhold viktig å poengtere er at:

- Informasjon i henhold til innbyggernes belastning på VA-systemene er uvisst på mikronivå. Dette fører til at det er vanskelig å gebyrlegge enhver innbygger etter virkelig belastning og kostnad. Administrasjonskostnader ved et slikt gebyrsystem kan dessuten antas som uforholdsmessig høy.
- VA-sektoren kan bli brukt som et instrument for å føre ønsket lokalpolitikk. Ønske om et høyere innbyggertall og mer tilflytting kan føre til høy fortetting og uheldig utbygging i forhold til hva som er optimalt. Dette er et eksempel på at interessegrupper kan påvirke VA-sektoren til endret adferd i forhold til hva som er samfunnsøkonomisk optimalt, noe som er en markedseffekt omtalt av blant annet Posner (1974).
- VA-sektoren er på grunn av store transaksjonskostnader knyttet til flytting i en posisjon for å kunne utøve markedsmakt, og selvkostprinsippet som VA-sektoren drives etter gir ikke i seg selv tilstrekkelige økonomiske insentiver til å minimere kostnader eller opprettholde kvalitet i henhold til økonomisk teori på området (Brennan 1989; KR D 2003).
- Ved funksjonssvikt som skyldes overskridelser av dimensjonerende normer (se f. eks kapittel 4.3) vil store deler av skaden dekkes av nasjonal forsikringsbransje, noe som gir svakere økonomisk signal til å investere i mer kapasitet og større sikkerhet, enn hva som kan være samfunnsøkonomisk optimalt, da kostnadene ved oversvømmelser ikke må dekkes av kommunen og lokalsamfunnet alene.

⁹ Karakter 5 er beste resultat, der hvor anlegget kan antas som nytt og trenger minimalt med vedlikehold om flere år. Karakter 1 er dårligste resultat, der hvor anlegget ikke lenger oppfyller sin tiltenkte funksjon (RIF 2010).

- Det er knyttet stor usikkerhet til samfunnsøkonomisk endring av nytte i forhold til endret risiko for svikt i VA-sektoren. De faktiske kostnadene for personene det gjelder, avhenger av om personene er risikoavers eller risikovillige.
- Samfunnsøkonomiske analyser kan ikke behandle alle mulige forhold i en beslutningsfase, og kan dermed ikke være eneste beslutningsmoment.

Men selv om samfunnsøkonomiske analyser vil i stor grad være ufullstendige, vil en forbedring av disse kunne føre til at man kommer nærmere samfunnsøkonomisk optimum. Det er da nyttig å kartlegge kostnader som påløper både direkte og indirekte ved oversvømmelser og overløpsutslipp, samt frekvens eller gjentakintervall for hendelsene.

Uavhengig av analysemetode som blir benyttet, burde det arbeides for at hovedvekten av eksterne effekter blir inkludert i analysen på et eller annet stadium. Ikke alle kostnader knyttet til VA-infrastruktur blir belastet direkte kommunene, men private eiere av eiendom, leietakere og forsikringsfirmaer er også bærere av kostnader ved flom og oversvømmelse. I tillegg vil det være kostnader knyttet til ulike typer forurensing, som også må inkluderes i analysen.

I en dansk undersøkelse benyttes en diskonteringsrate på 3 % ved nåverdiberegninger av fremtidige klimaskader (Miljøstyrelsen 2007). I Norge kan den risikofrie realrenten antas å settes til 3,5 %, men denne bør korrigeres etter alternativkostnaden ved å binde kapital i offentlige investeringsobjekter (NOU 1997), men ved økonomisk lønnsomhetsvurdering av investeringer kan statens kalkulasjonsrente benyttes, og den gir da uttrykk for samfunnets tidspreferanse (KRD 2003).

Miljøstyrelsen (2007) har for Ålborg og Roskilde gjort en samfunnsøkonomisk vurdering av klimaeffekter og tiltak hvor de har implementert direkte og indirekte kostnader ved oversvømmelse i byene. De har vurdert skader og ulike kostnader ved 100 års regnhendelse for:

- Trafikkforstyrrelser – forsinkelser for bilister på berørte hovedveier (arbeid-bolig transport)
- Antall veibrudd
- Oversvømmelse av stuegulv
- Kjelleroversvømmelse i boliger
- Svikt i el-forsyning
- Oversvømmelse i matbutikk – antall matbutikker som får kjelleroversvømmelse
- Oversvømmelse i andre butikker – antall virksomheter med kjelleroversvømmelse, der det antas lager i kjeller
- Skader på kloakkanlegg
- Administrasjonsomkostninger for kommunen – antall timer kommunalt ansatte bruker på skadene
- Helse – antall personer i kontakt med spillvann

Hydrologiske modeller estimerte skadeomfanget, og antall skader blir så multiplisert med samfunnsøkonomiske enhetskostnader, der hvor utregningene er forenklet. Dette betyr at særskilte objekter med stor samfunnsmessig betydning må vurderes med skjønn, noe som også ble gjort for historisk viktige områder i Roskilde (Miljøstyrelsen 2007).

Det økonomiske beslutningsgrunnlaget benyttet av Miljøstyrelsen (2007) var en cost-benefit analyse (CBA) og en cost-effectiveness analyse (CEA) hvor begge metodene baseres på en netto nåverdiberegning¹⁰.

CBA: Nåverdibetraktning av et tiltaks besparelser på grunn av reduksjon i fremtidige kostnader på grunn av skader fra fremtidig nedbør og kostnader forbundet med tiltaket. Analysen er definert slik at et tiltak er samfunnsøkonomisk fordelaktig hvis nåverdien av fremtidige besparelser er høyere enn det tiltaket koster i anskaffelse og drift.

CEA: Dette er fortsatt en nåverdibetraktning av fremtidige besparelser fra et tiltak, men analysen baserer seg isteden på å kunne rangere og diskriminere tiltakene slik at de tiltakene som gir høyest besparelser per investerte krone blir rangert som best. Det kan da settes krav om f. eks hvor sjeldent husstander skal oppleve kjelleroversvømmelse, noe som kan være en metode det er politisk lettere å gjennomføre.

Watt et al. (2003) har undersøkt fordeler og ulemper med flere klimatiltak som kan implementeres i et eksisterende område. Det ble også gjort vurderinger om tiltakenes implikasjoner for miljø, samfunn og estetisk effekt. I Tabell 9 vises fordeler og ulemper ved gitte tiltak.

Tabell 9: Oversikt over fordeler og ulemper knyttet til tiltak mot økt avrenning fra urbane områder. Tabellen er oversatt av forfatteren etter Watt et al. (2003).

Tiltak	Fordel	Ulempe
Utskiftning av rør <ul style="list-style-type: none"> • Installasjon av større rør for å hindre oversvømmelse. 	Øker kapasiteten for røret slik at bortledingen av ønskede vannmengder er mulig.	For store kostnader hvis rørene ikke må skiftes på grunn av annet vedlikehold.
Frakobling av tette flater <ul style="list-style-type: none"> • Frakobling av takflater, slik at vannet drenerer til grøntområder. 	Reduserer vannmengdene inn i avløpssystemet og reduserer vanningsbehovet.	Det kan være vanskelig å motivere huseiere til å gjennomføre tiltaket, og tilgjengelig areal kan være for lite til å ta hånd om vannmengdene fra taket. Vann kan renne til naboer på overflaten.
Øke overflatemagasineringen <ul style="list-style-type: none"> • Lede avrenningen på overflaten til offentlige plasser. 	Vann kan ledes til permeable flater og i infiltrere ned i grunnen.	Offentlige områder som benyttes vil være utilgjengelige i perioder etter kraftig regnvær.
Redusere mengder regnvann som drenerer til avløpet <ul style="list-style-type: none"> • Strupe gatesluk etc. og bruke gater og parkeringsplasser for midlertidig overflatemagasinering. 	Overflatevann kommer ikke inn i avløpssystemet.	Vann i veien kan hindre trafikk, og vannet kan samles opp på privat grunn, hvis tiltaket ikke planlegges godt nok.
Øke volumet i dammer <ul style="list-style-type: none"> • Modifisere utløps- 	Overflatevann kommer ikke inn i avløpssystemet.	Dette tiltaket kan medføre store byggekostnader, og det

¹⁰ Ved en netto nåverdiberegning blir tidsmessige forskjellige økonomiske hendelser diskontert til samme referansetid (nåtid) ved bruk av en valgt diskonteringsrente.

arrangementet og endre arealet av dam.		kan være problemer med å anskaffe nødvendig areal.
Infiltrasjon <ul style="list-style-type: none"> Konstruere grøfter og infiltrasjonsbassenger. 	Avrenning infiltrerer til grunnen.	Dette krever at grunnen har infiltrasjonskapasitet.

For de eksterne implikasjoner ved tiltakene, gjorde Watt et al. (2003) en kvantitativ analyse. Implikasjonene gikk da fra store positive følger til store negative følger. Dette er vist i Tabell 10.

Tabell 10: Oversikt over eksterne implikasjoner ved tiltak mot økt avrenning fra urbane områder. Tabellen er oversatt og forkortet av forfatteren etter Watt et al. (2003).

Tiltak og fysisk beskrivelse	Type implikasjon		
	Miljø	Samfunn	Estetikk
Utskiftning av rør <ul style="list-style-type: none"> Utgravning, fjerning og utbygging av rør. 	- øker fluks til resipient (f. eks økt fare for erosjon) (4)	- ingen virkning på samfunnet (3)	- under utførelse ¹¹ (5) - etter fullføring (ny asfalt etc.) (1)
Frakobling av tette flater <ul style="list-style-type: none"> Vann fra tak ledes til plen og avrenning kan infiltrere 	- effektiv reduksjon av vannstrøm i avløpsnett (1) - mulighet for å øke grunnvannet i urbane områder (1)	- reduserer behovet for vanning (2) - vann kan komme på naboens eiendom (2)	- ingen opplagte estetisk på virkning (3)
Økt overflatelagring av vann <ul style="list-style-type: none"> Tilrettelegging av offentlig land slik at avrenning er lagret med mulighet til å infiltrere 	- reduserer vann i avløpssystemet (2) - mulighet for å opprettholde grunnvannet (2) - konsentrasjon av forurensing på gress (4)	- området kan ikke benyttes etter gitte regnhendelser (f. eks så må de dreneres og tørkes) (4)	- det kan gro ugress på diker (4) - stille overflatevann kan være habitat for mygg (4)
Redusere mengder regnvann som drenerer til avløpet <ul style="list-style-type: none"> Strupe gatesluk etc. og bruke gater og parkeringsplasser for midlertidig 	- reduserer regnvann inn i systemet, som igjen reduserer faren for erosjon (2)	- vann i gaten kan påvirke trafikk (4)	- ingen opplagte estetisk på virkning (3)

I Tabell 10 blir implikasjonene vurdert etter:

1. Store positive følger
2. Små positive følger
3. Ingen opplagte følger
4. Små negative følger
5. Store negative følger

¹¹ NO-Dig metoder kan i mange tilfeller være billigere, raskere og mindre forstyrrende for publikum.

Enhver vurdering av implikasjonene vil variere fra tilfelle til tilfelle. Men selv om dette ikke er noen generell fasit, er det en metode for å måle indirekte effekter på miljø, samfunn og estetikk, som følger av tiltakene.

4.8 Konsekvenser for infrastruktur og miljø på grunn av endringer i den hydrologiske syklus

Graden av sårbarhet ovenfor klimaendringer for infrastruktur innen vann og avløp vil avhenge av hvor store klimaendringene blir og hvilken avløpsinfrastruktur det er snakk om. Watt et al. (2003) deler avløpsinfrastrukturen inn i fire kategorier, hvor funksjonen er ledende for inndelingen:

- Innretninger for transport av vann, som f. eks grøfter, rør, veier, kanaler, urbane bekker og elver.
- Innretninger til fordrøyning, som f. eks fordrøyningsbasseng, kassetmagasin, dammer og infiltrasjonssystemer.
- Innretninger som skal både fordrøye og forbedre vannkvalitet.
- Innretninger for å hindre overløpsutslipp fra fellessystemet.

Klimaendringer og endret arealbruk vil kunne forverre forurensningen fra VA-anlegg. Forurensningen kan da skje fra lekkasjer fra et utett ledningsnett, overløpsutslipp, overbelastning i renseanlegget eller ukontrollerte flomtilfeller (ut av kum etc.).

Lindholm et al. (2007) lagde et beskrivende sammendrag for klimaeffektene betydning på forurensningssituasjonen, og de poengterte blant annet at:

Overløpsutslipp: Økning i både regnintensitet og regnvarighet vil kunne føre til en *progressiv* økning i utslippene fra overløp.

Utspyling av masse: Hyppigere og mer intense regn gir forhold som fører til økt utspyling av rørsedimenter, rørvleiringer og sandfang. Dette skyldes at strømningsforholdene oftere overskrider stabil deponifase.

Utslipp fra renseanlegg (RA): Når større volumer av vann skal behandles i renseanleggene vil forurensningen øke. Dette skyldes først og fremst at forurensingsutslipp fra RA er betinget av renseseffekten og økte volummasser vil føre til økt forurensing, selv om renseseffekten er uendret.

Det kan også være tenkelig at økte vannvolumer kan gå ut over renseseffekten til RA, da enkelte RA er bygd opp med sekundærsystemer, som trer i kraft ved store vannføringer. Disse systemene kan ha dårligere renseseffekt enn primærsystemet.

Diffus erosjon: Hyppigere, lengre og kraftigere regn kan føre til mer eroderende strømningsforhold på blant annet permeable flater, bekkeleier og grøfter.

5 DHI Mike Urban modellmiljø

Mike Urban (MU) er et forbedret grensesnitt av MOUSE, hvor begge programmene kommer fra DHI Water and Environment. Dette utgjør en avansert urbanhydrologisk modell, og mange kommuner har allerede deler av avløpsnettene bygget opp med dette modellmiljøet. MU ble valgt i denne oppgaven, både fordi modellen var ferdig bygd, men også fordi modellmiljøet er ledende for å modellere vannmengde og vannkvalitet i urbane systemer. Modellmiljøet består av flere moduler, som tar for seg forskjellige oppgaver. Moduler vurdert benyttet i denne oppgaven er:

Rask avrenning - overflateavrenning: I denne modulen vil overflateavrenningen og dermed overflatens direkte bidrag til ledningsnettene beregnes. Det er mulig å velge fire forskjellige metoder for beregning av overflateavrenning, hvor metodene er forskjellig i både kompleksitet og antall parametere som må stilles. Metodene er tid/arealmetoden, ikke-lineært reservoar, lineært reservoar og enhetshydrogram modellen. I en modellkjøring er det kun mulig å benytte en metode for overflateavrenning (DHI 2008d).

Avansert avrenning - RDII (Rainfall Dependent Inflow and Infiltration): Dette er en avansert hydrologisk modell som tar for seg komplisert avrenning gjennom overflateprosesser til ledningsnettene. Modellen kan lede vann gjennom fire forskjellige magasiner, som snømagasin, overflatemagasiner, markvann og grunnvann. På denne måten kan modellen også beskrive den trege avrenningen. Modellen har også hydrologisk minne, for å kunne kjøre serier av simuleringer, der hvor tilstanden til magasinene har stor betydning for avrenningsresponsen til ledningsnettene (DHI 2008b).

Rørstrømning - HD (Hydraulic Dynamics): Modulen tar for seg strømning i ulike strømningsregimer med variabel strømning i nettverk av rør med komplisert geometri. Vannoverflaten kan enten være under trykk, eller med fri overflate og modulen kan i sin mest avanserte form regne med oppstuvning og fordrøyning i rørvolumet. Dette gjøres ved at modellen løser hele Saint Venant's ligning numerisk. Modellen kan også beregne strømning i kanaler med enkel geometri. Videre kan vanlige innretninger i et kloakksystem beskrives, slik som (DHI 2008c):

- Rør med forskjellig geometri på tverrsnittet
- Runde kummer
- Fordrøyningsbasseng
- Nødoverløp
- Pumper og pumpestyring
- Passiv og aktiv regulering av fluks
- Konstant eller tidsvariabel vannstand ved utløpet
- Konstant eller variabel vannfluks inn i avløpssystemet
- Tap i fordrøyningsbasseng og kummer
- Friksjonskoeffisienten kan variere med dybden

Og med disse egenskapene kan forenklede men relativt realistiske simuleringer gjøres for ulike analyser av fremtidige og eksisterende avløpsnett.

Langtidssimulering med statistiske analyser LTS (Long Term Statistics): Modulen forenkler langtidssimulering med nedbørsdata bestående av lange tidsserier som inndata. Den gjør dette ved å

selektere ut nedbørshendelser av interesse før avrenning rutes til modulen for rørstrømning. Dette rasjonaliserer simuleringen, og minimerer sannsynligheten for at relevante hydrauliske hendelser (overløpsutslipp, oppstuvning etc.) i systemet går tapt. Modulen produserer statistiske rapporter på disse hendelsene, som f. eks gjentaksintervall for oppstuvning over rør i kum eller antall ganger overløpet er i funksjon per år (DHI 2008a).

Det finnes flere moduler i MOUSE/MU-modellmiljøet til DHI, som RTC, TRAP, SRQ, AD, WQ, ST, men disse vil ikke bli brukt eller omtalt her. Nå følger en grundigere gjennomgang av hvilke moduler relevant for denne oppgaven, som trenger utdypende beskrivelse.

5.1 Rask avrenning - Overflateavrenning

Som nevnt tidligere er det fire hovedmetoder for beregning av overflateavrenning i Mouse-miljøet, hvor enhver metode egner seg etter hvor mye informasjon man har om feltene som er koblet til modellen. I denne oppgaven er avrenningsmodell A benyttet, som er den såkalte tid-arealmetoden. Denne metoden benytter seg av nedbørsfeltdata og hydrologiske parametere for å bestemme avrenningen fra feltet. For tid-arealmetoden trenger man da å sette feltparametere og hydrologiske parametere som (DHI 2008d):

Feltparametere:

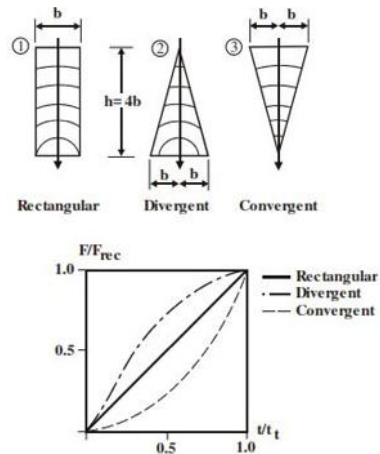
- **ID** - unik identifikasjon av feltet.
- **Beliggenhet** - beskriver hvor feltet kobles til avløpssystemet.
- **Feltstørrelse [ha]** - horisontal overflateareal til feltet.
- **Innbyggere** - antall mennesker som har et vannforbruk i feltet. Benyttes kun til tørrværsavrenning.
- **Annet avrenningsbidrag [m^3/s]** - avrenning som legges til avrenningshydrografen, som f. eks et konstant infiltrasjonsbidrag i simulering av enkelthendelser.

Modellspesifikke data:

- **Andel tette flater [%]**- andel av overflaten som er antatt å bidra til den raske avrenningen.

Hydrologiske parametere:

- **Overflatemagasinerings [mm]** - en gitt nedbørsmengde vil fukte overflaten og fylle små forsenkninger og ujevnheter på de tette flatene. Denne nedbøren vil ikke nå rørnettet. Standard verdi er 0,6 mm.
- **Feltets konsentrasjonstid [min]**- dette er tiden det tar før hele feltet bidrar med avrenning til ledningsnettet. Standard verdi er 7 min.
- **Hydrologisk tap** - reduserende faktor som skal ta hensyn til vanntap som skyldes evapotranspirasjon, imperfekte tette flater og at tette flater kan drenere til overflate og ikke direkte til ledningsnett. Standard verdi er 0,9.
- **Tid-arealkurve** - redegjør for geometrien til feltet og hvordan bidragende areal endrer seg med tiden. Eksempler på tid-arealkurver og tilhørende antatt geometri på delfeltene er vist i Figur 21.



Figur 21: De tre standardutformingene til delfeltene i MOUSE med tilhørende tid-arealkurver (DHI 2008d).

Avrenningen starter når oppsamlet regnvolum er større enn overflatemagasineringskapasiteten for delfeltet og stopper når akkumulert regndybde på overflaten blir mindre enn overflatemagasineringskapasiteten i delfeltet (DHI 2008d).

I ethvert tidssteg etter regnstart i den diskrete modellen, renner oppsamlet vannmengde i en delcelle i feltet til delcellen nedstrøms. For hver celle er det da et vannregnskap, hvor volumet av vann i aktuell celle er tilrenning fra cellen oppstrøms og nedbørmengde på cellen minus avrenning til cellen nedstrøms. Avrenning fra den nederste cellen vil da representere hydrogrammet for delfeltet, etter at det er tatt hensyn til hydrologisk tap (DHI 2008d).

5.2 Avansert avrenning - RDII

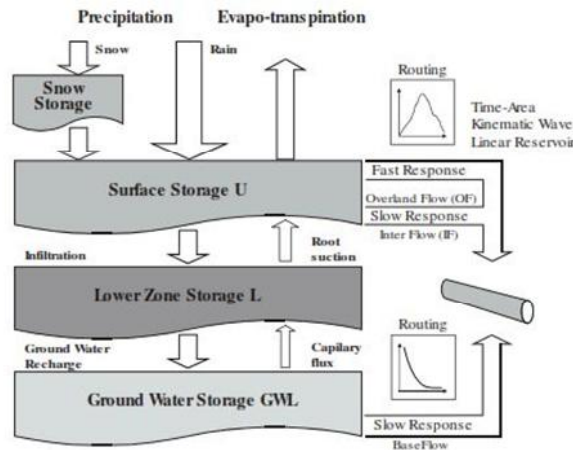
RDII-modulen beskriver hydrologiske prosesser i landfasen på en forenklet måte. Den hydrologiske modellen er deterministisk, konseptuell og forenklet med forholdsvis moderate krav til spesiell beskrivelse av systemet fra eksterne parametere. Modellen behandler hvert delfelt som en enhet og parametere som benyttes er da gjennomsnittsparemetere for delfeltet (DHI 2008b). Modellen tar for seg nedbør som treffer områder definert som permeable flater.

Modellen er delvis basert på fysisk beskrivelse og empiriske funksjoner for de forskjellige prosessene, og for det området av delfeltet som ikke er definert som tette flater, vil RDII-modellen beregne den hydrologiske syklusen hvor vannet kan holdes tilbake i delfeltet i fire lagre (DHI 2008b). RDII-modellen er vist grafisk i Figur 22. Dette muliggjør beregning av rask og treg avrenning. De fire lagrene i RDII-modulen er:

- **Snølager** - nedbør som kommer gjennom snølageret er avhengig av temperaturforhold og snømengde i delfeltet til enhver tid.
- **Overflatelager** - nedbør som fanges på overflaten, der hvor nedbør fukter vegetasjonsdekket og små groper på overflaten, blir holdt tilbake i overflatelageret. Gitt at det er vann i overflatelageret, vil vann fordampe ut av lageret likt potensiell evapotranspirasjon. Når maksimal overflatelagring er oppnådd, vil vann infiltrere ned til markvannssonen (treg avrenning) og noe vil renne av på overflaten eller i makroporer og ned i ledningsnett (rask avrenning).
- **Markvann** - vann i den umettede sonen er utsatt for evapotranspirasjon, når overflatelageret er tomt for vann. Fordampningen er avhengig av vanninnhold i marksonen, hvor lavere

vanninnhold fører til lavere evapotranspirasjon. Vanninnholdet i denne sonen påvirker dessuten volumfluks på overflaten og hvor mye vann som perkolerer til grunnvannet.

- **Grunnvann** - vann som befinner seg i den mettede sonen i grunnen, hvor massebalansen er bestemt av perkolasjon inn i sonen, kapillær transport av vann opp til markvannet og treg avrenning som infiltrasjon inn i ledningsnett.



Figur 22: Rutingstrukturen til RDII-modulen (DHI 2008b).

Fordelene ved RDII-modellen er da at det er mulig både å beregne feltets trege og raske avrenning. Dette muliggjør bedre kontinuerlige simuleringer, hvor responsen til et nedbørstilfelle avhenger av tilstanden til feltet og treg avrenning, som blir simulert av RDII-modulen(DHI 2008b).

5.3 Rørstrømning - HD

Rørstrømningsmodellen i MOUSE benytter flere hydrauliske ligninger for å beskrive elementene som kan finnes i et avløpsnett. Selve nettverkshydraulikken blir styrt av Saint Venants ligningssett og disse er listet opp under (DHI 2008c):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

Formel 2: Saint Venants kontinuitetsligning.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{\partial Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} - gA(I_0 - I_f) = 0$$

Formel 3: Saint Venants momentligning.

hvor

Q – volumfluks	[L ³ /T]	[m ³ /s]
A - areal på det strømmende tverrsnitt	[L ²]	[m ²]
y - vannspeilets høyde	[L]	[m]
g – tyngdeakselerasjonen	[L/T ²]	[m/s ²]
x - avstand fra knutepunkt i rør eller kanal	[L]	[m]
t – tid	[T]	[s]
I ₀ - bunnens helning	[-]	Dimensjonsløs
I _f - helning pga friksjon	[-]	Dimensjonsløs

Med dette ligningssettet kan MOUSE beskrive dynamisk bølge, og dette gjøres numerisk for hele nettverkssystemet, der hvor løsningen er vannstand og volumfluks i rørnett. Grensebetingelsene for ligningssettet er hydrografene, som beskriver hvordan vannet entrer ledningsnett for ethvert punkt dette skjer til enhver tid. Eventuell vannstand i resipient kan påvirke hydrologisk kapasitet til systemet (DHI 2008c).

Kontinuitetsligningen sier at endringen i volumstrøm (∂Q) for en del av rørseksjonen (∂x), fører til en endring i vannmengde i seksjonen, uttrykt som endring i tverrsnittareal ∂A . Momentligningen beskriver de ulike kreftene som påvirker vannlegemet. Ved beregning av den komplette momentligningen, vil både treghets- trykk, gravitasjon- og friksjonskrefter bli inkludert i beregningen (DHI 2008c). Med prosesseringskraft som dagens datamaskiner har, er det ingen grunn til å velge en annen beregningsmåte, enn å benytte hele Saint Venants momentligning (dynamisk bølge) ved simuleringen (Nilsen 2008).

Saint Venants ligningssett gjelder per definisjon for vannstrømning med fri overflate, men ved å innføre et "falskt" tynt spor i toppen av røret, kan ligningssettet tilnærmes til å simulere strømning med overtrykk. Denne metoden ble først introdusert av Preissmann og Crunge (DHI 2008c).

5.4 Rosie

Rosie er en ArcGIS ekstensjon laget av Rosim AS, som skal forenkle databehandlingen. Ekstensjonen har funksjoner som gjør prosessen med modelloppbygging, oppdatering av modell, simuleringer og presentasjon av resultater mer effektiv. I Rosie er alle GIS-funksjonene fra ArcGIS tilgjengelig og modellen kan da enkelt knyttes opp mot befolkningsdata og bebyggelse som kan finnes i GIS-databaser. Rosie benytter seg av den samme løsningsmotoren som finnes i MOUSE-miljøet og inkluderer et arbeidssystem som systematiserer endringer (klimaskalering, tiltak osv).

5.5 Andre hydrologiske modeller fra DHI

I mange analyser vil en urbanhydrologisk modell komme til kort, da de ikke beskriver flom på overflaten, vannstand i elv og bekk eller avrenning fra rurale områder særlig godt. Dette kan da gjøres med andre modeller, som kan integreres med Mike Urban:

- **Mike 11** - modellerer elver med mulighet for flomanalyser.
- **Mike FLOOD** - modellerer overflateflom og kan koble overflateflom med rørstrømning.
- **Mike SHE** - modellerer grunnvann, overflatevann og prosesser som evapotranspirasjon, infiltrasjon og perkolasjon i rurale områder hvor et felts avrenning til bekk eller elv kan beregnes.

6 Metode

I arbeidet med å simulere regnhendelser ble det i denne oppgaven valgt å ikke kjøre tidssimuleringer med RDII modulen på grunn av dårlig tid. Modellen for avløpssystemet i Charlottenlund og Ranheim inneholder 1557 kummer, 1570 rør, 18 pumper og 14 overløp. Dette gjør at den er relativt datatung. Simulering ble da isteden fokusert rundt analyse av rask avrenning fra korte ekstreme regnhendelser. Det var da behov for å lage en metode som kan finne de regnene som antatt vil gi størst belastning på avløpssystemet.

Som forsøk på å estimere klimaets påvirkning på korte regn ble en DCF-metode med sesongvis fokus benyttet. Denne metoden ble valgt fordi den er enkel av struktur, og den leverer egnete resultatdata fra en klimamodell, som er fritt tilgjengelig på internett.

6.1 Kalkulering av DCF

Inspirert av Holvik (2010) ble det utregnet gjennomsnittlige DCF for vår, sommer høst og vinter mellom kontrollperioden 1961 til 1990 og scenarioperioden 2071 til 2100. Denne metoden tar utgangspunkt i å sammenligne endringer i nedbør fra kontrollperioden og et scenario i fremtiden sesongvis.

Modellen og resultatdata som ble benyttet er resultatene fra NoSerC prosjektet, og resultater fra empirisk og dynamisk nedskalering for Værnesområdet ble valgt i denne oppgaven. Utvelgelsen kan begrunnes i at dette datasettet representerer et område nærmest Ranheim og Sjøskogbekken som er representert i databasen til NoSerC.

NoSerC dataene er basert på en dynamisk sammenhengende modell bygget opp av:

- AOGCM -> "HadAm3"
- RCM -> "HIRHAM"

Den tidlige oppløsningen til denne modellen er døgnvis og datamaterialet finnes i sin helhet på http://noserc.met.no/effect/dynamic/stasjoner/detail_69100.html.

I Tabell 11 er resultatene fra DCF-estimeringen vist gjennomsnittlig for sesongene mellom scenario- og kontrollperiode. Resultatene viser at selve diskusjonen omkring valg av scenario er av mindre viktighet, da begge scenarioene fører til mindre signifikante ulikheter mellom sesongenes DCF gitt dette datasettet. Videre vil det innføres større usikkerhet når resultatene fra denne sesongvise fremstillingen skal beskrive forventet endring i nedbørsmengde for korte intense regn.

Tabell 11: Sesongmessig gjennomsnittlige DCF for Værnes.

DCF - A2/CONTROL	vinter	vår	sommer	høst
AVERAGE	1.18	1.23	1.33	1.25
DCF - B2/CONTROL	vinter	vår	sommer	høst
AVERAGE	1.29	1.14	1.31	1.36

6.2 Utvelgelse av regnhendelser (1)

Det ble forsøkt å konstruere et designregn (regnhyetogram), men på grunn av IVF-kurvens form førte metoden til negative regnintensiteter i noen av tidsrommene til designregnet. Dette skyldes at metoden for å konstruere regnhyetogram krever at nedbørsvolumet øker etter som lengden på intervallet for kasseregnene i IVF-kurven øker. Dette kan sees i Tabell 15 i kapittel 6.4, der hvor nedbørsummen for regn med 10 og 20 års gjentakintervall er mindre for regn med 60 minutters varighet enn ved regn med 45 minutters varighet. Det ble da valgt å basere videre analyse på et sett med utvalgte regnhendelser. Flere regn ble valgt i tilfelle et regn ville produsere odde resultater.

Ved gjennomgang av lange tidsserier med regndata kan det være tidkrevende og utfordrende å velge de største regnhendelsene. Dataene strekker seg over 40 år, hvor regnstasjonen har registrert hvor mye regn det har falt i forrigegående minutt. Dette har skjedd med noen opphold av ukjente årsaker og et stasjonsbytte mellom 1989 og 1990. Nedbørstasjonen på Voll har produsert målingene fra 1969 til 1989 og Risvollan fra 1990 til 2009. Disse stasjonene skal representere det samme hydrologiske regimet, siden avstanden mellom dem er lav, men variasjoner mellom stasjonene kan føre til noen forskjeller i data. En enkel sjekk av datafilene fra disse to nedbørstasjonene viser at Risvollan blant annet har langt flere observasjoner enn Voll.

Regnhendelsene som skulle analyseres ble valgt ut slik at hendelsene kunne danne en årlig maksimalserie. Denne metoden kan i følge Chow (1964) utelate viktige store hendelser, men ble likevel valgt da den ble funnet gjennomførbart, samt at ekstremverdianalyse kan gjøres på de årlige maksimalverdiene. Utvelgelseskriteriet for ulike regn var da å finne de nedbørsituasjonene som hadde maksimal nedbør innenfor et gitt tidsrom. På grunn av egenskapene til urbane nedbørsfelt og at fokuset var korte hendelser, ble en time valgt som tidsrom.

Et MATLAB-skript (se Vedlegg A: MATLAB-skript, gisData.m) ble lagd for å finne største regn for et gitt intervall innenfor hvert kalenderår, og deretter produsere resultatet i ANSI-tekstfiler som vist i Tabell 12. Skriptet har flere funksjoner det arbeider etter, og kan oppsummeres i:

1. Lesing av datafil inn til MATLAB-miljøet.
2. Kvalitetssikring av data, der hvor negative måledata blir slettet. Disse negative måledataene representerer kun opphold i måleserien, der hvor årsaken kan være ukjent (Holvik 2010).
3. Sekvens som konstruerer matriser som representerer alle mulige kombinasjoner av regnhendelser med ønsket intervall.
4. Utvelgelse av det regn med maksimal nedbørsum innenfor ønsket intervall.
5. Utskrift av maksimale årlige regn til ANSI-tekstfil.

Etter videre arbeid med disse dataene, ble forfatteren gjort oppmerksom på at Rosie ikke tolket regndataene i samsvar med fysisk tolkning, og videre behandling av regndataene måtte gjøres.

6.3 Samstemming av regndata til korrekt fysisk tolkning

Rosie leser regndata på en spesiell måte, slik at eKlima-målingene må omformes for å få fysisk korrekt tolkning. Den største regnhendelsen begrenset innenfor en time i året 1969 er vist i Tabell 12, der hvor fysisk tolkning i denne sammenheng har antakelsene:

- Regn registrert som målerverdi ved f. eks 1969-08-06 21:41:00 er gjennomsnittlig måling for et minutt, altså intensitet på 10 μ -m/s med varighet fra 1969-08-06 21:40:00 til 1969-08-06 21:41:00.

Og tidspunktene uten regnmålinger kan ha fysisk tolkning som:

1. Tidspunkter uten målinger har ikke nedbør. Nedbørsmengden er da 0,0 mellom 1969-08-06 21:59:00 og 1969-08-06 22:20:00.
2. En alternativ fysisk tolkning av intervaller uten målinger er at nedbør i disse intervallene skjer med for lav gjennomsnittlig intensitet at det ikke registreres i måleren, men samles da opp til registrering når vippekaret er fullt.

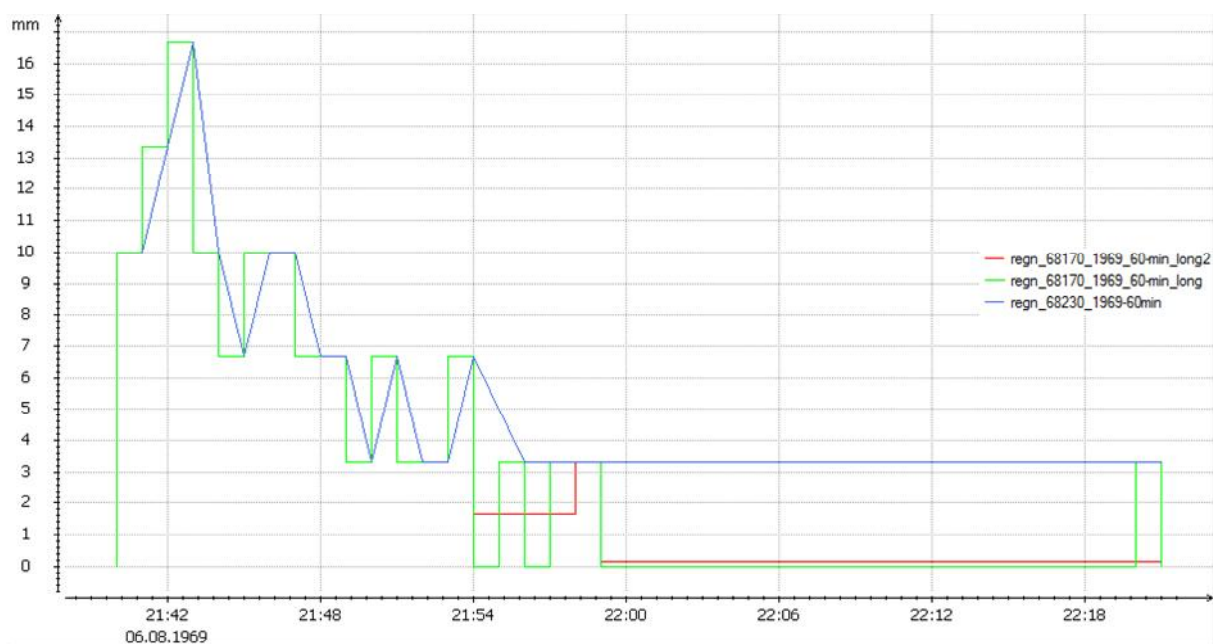
Hvilken av antakelsene en og to som er riktig vil variere fra regnhendelse til regnhendelse. I alle tilfeller er begge kun en tilnærming til det virkelige regnet uansett. En fordel med antakelse to er at regnene innenfor et gitt tidsintervall blir tolket som kontinuerlige.

Før omforming interpolerer Rosie regnintensiteten mellom datapunktene, slik at for høy intensitet blir innført i perioder uten data for fysisk regn. Samtidig vil programmet systematisk over- eller underestimere regnintensiteten for kortere perioder, avhengig av interpoleringen.

Tabell 12: Største regnhendelse med varighet på en time eller mindre for år 1969. Den faktiske regnhendelsen kan være lengre.

Time	'Regn'	Mean_Step_Accumulated
1969-08-06 21:41:00		10
1969-08-06 21:42:00		13.3333
1969-08-06 21:43:00		16.6667
1969-08-06 21:44:00		10
1969-08-06 21:45:00		6.6667
1969-08-06 21:46:00		10
1969-08-06 21:47:00		10
1969-08-06 21:48:00		6.6667
1969-08-06 21:49:00		6.6667
1969-08-06 21:50:00		3.3333
1969-08-06 21:51:00		6.6667
1969-08-06 21:52:00		3.3333
1969-08-06 21:53:00		3.3333
1969-08-06 21:54:00		6.6667
1969-08-06 21:56:00		3.3333
1969-08-06 21:58:00		3.3333
1969-08-06 21:59:00		3.3333
1969-08-06 22:21:00		3.3333

Det ble da utarbeidet enda et MATLAB-skript (se Vedlegg A: MATLAB-skript, gisData2.m) som omformer regnene slik at Rosie har en tolkning av regnhendelsen som samsvarer med den fysiske tolkingen man måtte ha for regnet. I Figur 23 vises maksimal timesregn i 1969 før og etter omformingene i Rosie. Regn betegnet *long er lagd etter antakelse en, og *long2 kommer fra antakelse to.



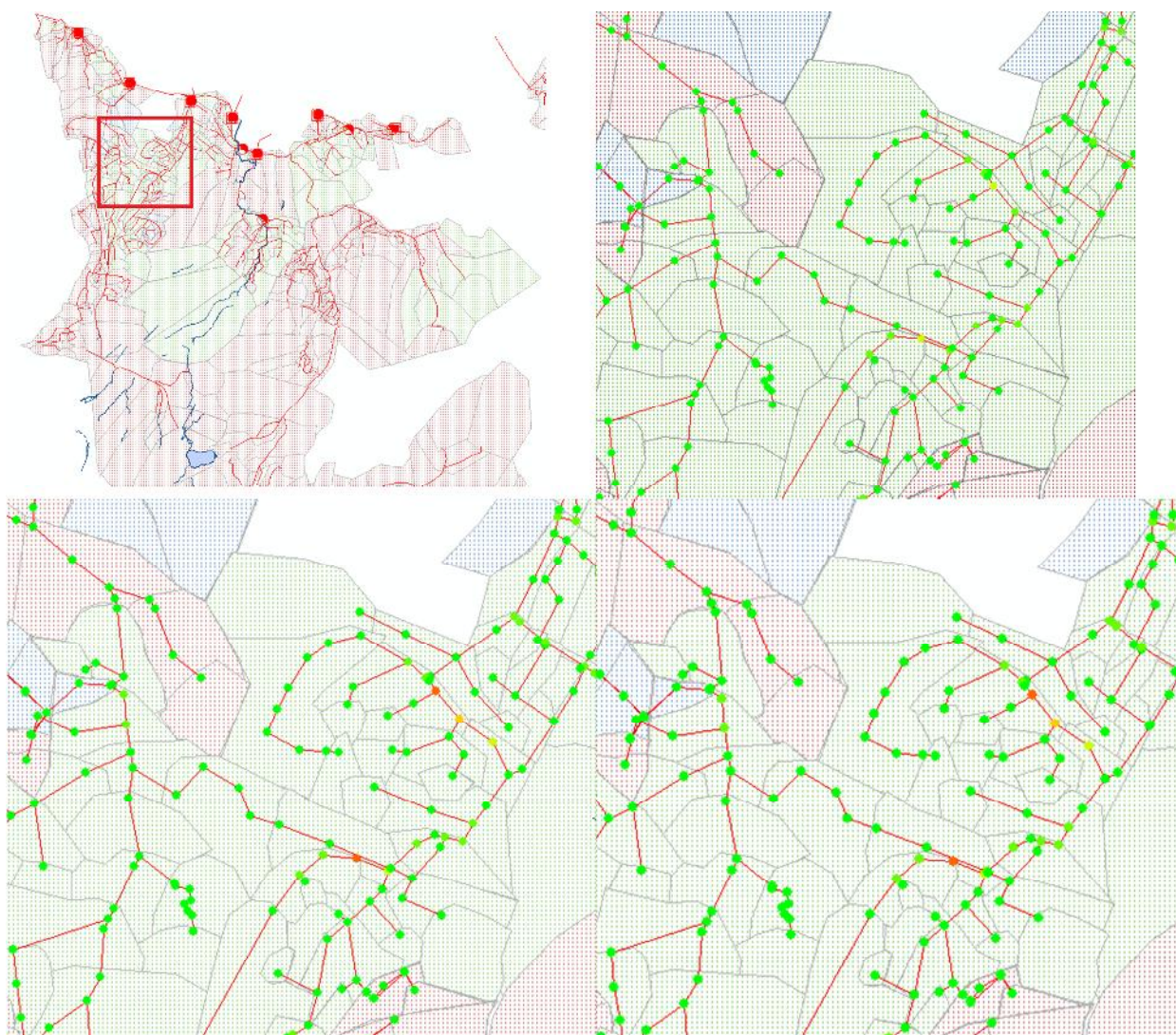
Figur 23: Sammenligning av maksimal timesregn i 1969 før og etter omforming.

Ved overflateavrenningssimulering med regnene i Figur 23, vil modellen av Ranheim avløpsområde gi en total avrenningsmengde på 2170 og 1407¹² (1433¹³) m³ på henholdsvis ubehandlet og omformet regn. De to omformede regnene har så å si samme avrenningsmengde, da de innehar samme nedbørsum per definisjon. Dette er et eksempel på at korrekt gjengivelse av regndataene kan ha signifikant betydning på de vannmengder VA-anlegget skal transportere. Ved å kjøre nettverksmodellen vil ulikhetene ved simulering av disse regnene være av ulik betydning, da f. eks vannmengder som går i overløp er 554,2 og 526,8 (528,9) m³ for de respektive regnene. På den annen side, vil en enkel visuell sjekk av Figur 24 viser at kritiske kummer kan bli påvirket av regnfremstillingen. Omforming av regnet vil i dette eksempelet føre til høyere og flere oppstuvninger i modellen (merket som oransje og gule kummer)¹⁴.

¹² “*long”

¹³ “*long2”

¹⁴Effekter og konklusjoner av endringen i regndataene kan variere ved omforming av andre regnhendelser.



Figur 24: Bildet øverst til venstre, med Trondheimsfjorden i nord, viser lokalisasjon til utsnittene. Utsnitt øverst til høyre er for ubehandlet regn, mens utsnitt nede til venstre er for regn etter antakelse en, og utsnitt nede til høyre er for regn etter antakelse to.

De to omformete regnene gir så å si samme resultat for en oppstuvningsanalyse for kummene, noe som samsvarer med plottingen vist i Figur 23, der hvor variasjonen mellom de to omformede regnfremstillingene er minimal i dette tilfellet og perioden med høy intensitet blir gjengitt helt likt for begge omformingene.

6.4 Statistisk analyse av regnhendelsene

Under utvelgelse av regnhendelser etter metoden beskrevet i kapittel 6.2, ble regnene i Tabell 13 beregnet til å være de årlige maksimale regnhendelsene, med 60 minutters beregningsintervall.

Tabell 13: Regnhendelser med størst nedbørsvolum innenfor 60 minutters intervall per år.

År	Måned	Nedbørsmengde	År	Måned	Nedbørsmengde
1969	8	7.6	1991	7	9.9
1970	10	4.8	1992	7	10.5
1971	8	9.2	1993	8	9
1972	5	7	1994	8	8
1973	7	9.4	1995	6	6.4
1974	7	9.8	1996	9	5.6
1975	8	12	1997	3	10.6
1976	9	6	1998	1	5.1
1977	8	9.2	1999	7	8.5
1978	9	6.8	2000	6	5
1979	7	6.4	2001	7	8.1
1980	8	10.4	2002	6	20.3
1981	6	3.6	2003	6	11.5
1982	7	8.7	2004	9	9.4
1983	7	7.2	2005	1	8.9
1986	10	5	2006	7	10.6
1987	9	17.8	2007	7	15.7
1988	5	3.6	2008	8	13.7
1989	9	8.2	2009	1	9.6
1990	9	12.5			

Av disse regnene velges de fem med størst nedbørsum i løpet av 60 min for videre analyse og hydrologisk simulering. Disse regnene er vist i Tabell 14.

Tabell 14: De fem største årsmaksimum for nedbørshendelser innenfor 60 minutters intervall fra 1969 til 2009. Gjentakintervall (år) i parentes etter IVF-kurven. Verdier merket med NA er ikke tilgjengelig.

År	Måned	Intervall						
		60 min	30 min	20 min	15 min	10 min	5 min	1 min
2002	6	20.3mm (50 – 100)	16.1mm (10 – 20)	11.8mm (5 – 10)	10.6mm (5 – 10)	7.8mm (2 – 5)	5.1mm (2 – 5)	3mm (25 – 50)
1987	9	17.8mm (25 – 50)	12.2mm (5 – 10)	10.4mm (5 – 10)	9.2mm (2 – 5)	7.2mm (2 – 5)	4.6mm (2 – 5)	2.2mm (5 – 10)
2007	7	15.7mm (10 – 20)	13.1mm (5 – 10)	11.8mm (5 – 10)	NA NA	NA NA	NA NA	NA NA
2008	8	13.7mm (5 – 10)	11.9mm (2 – 5)	11.2mm (5 – 10)	10.5mm (5 – 10)	9.6mm (10 – 20)	6.3mm (5 – 10)	2.6mm (2 – 5)
1990	9	12.5mm (2 – 5 år)	10.2mm (2 – 5)	7.7mm (< 2)	6.4mm (< 2)	4.9mm (< 2)	3.3mm (2 – 5)	1.6mm (2 – 5)

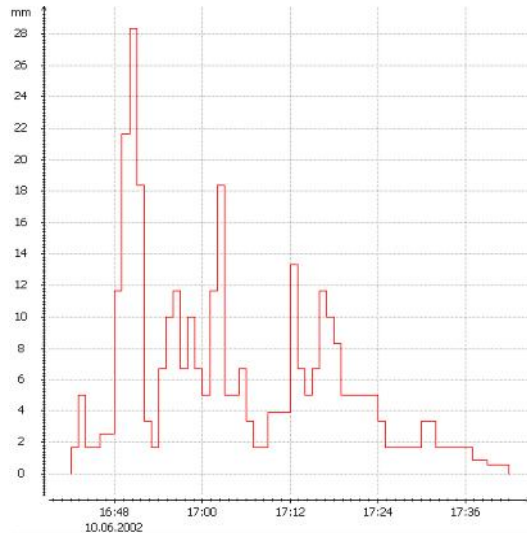
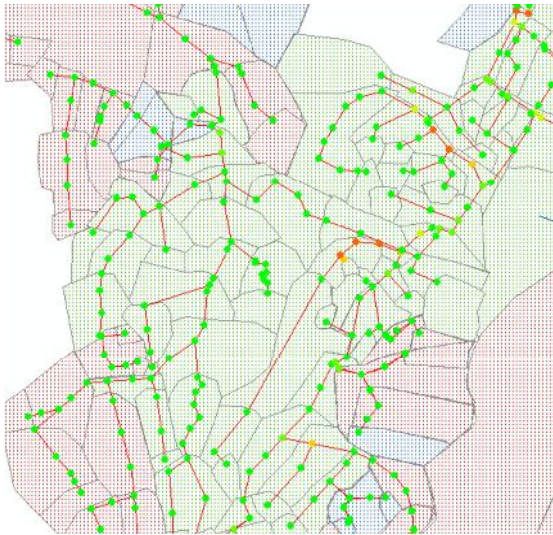
Av denne tabellen ser vi at de fem største hendelsene innenfor 60 minutter har skjedd i 1987 eller senere. For å finne gjentakintervallet for regn med 60 minutters varighet, kan tidligere konstruerte IVF-kurver benyttes for området. Fra MI har vi da en IVF-kurve for Risvollan, som er utarbeidet fra årlige maksimumsmålinger, og er vist i Tabell 15. Gjentakintervall for nedbørshendelsene er vist i parentes i Tabell 14.

Tabell 15: Returperioder for nedbørsum i mm for Risvollan i Trondheim. Tabellen baserer seg på målinger fra 23 sesonger, fra 1987 til 2009. Tabellen er hentet fra eKlima.no.

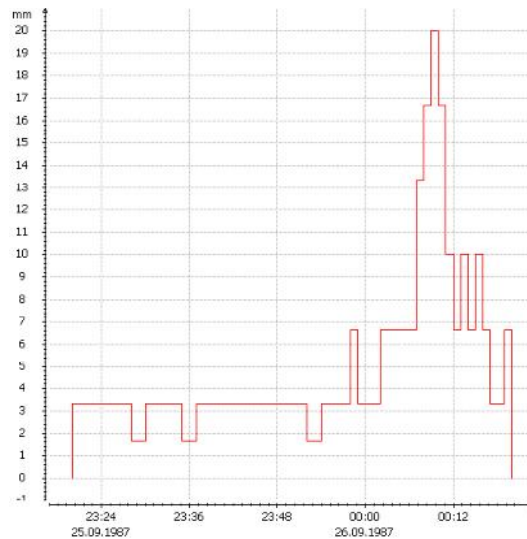
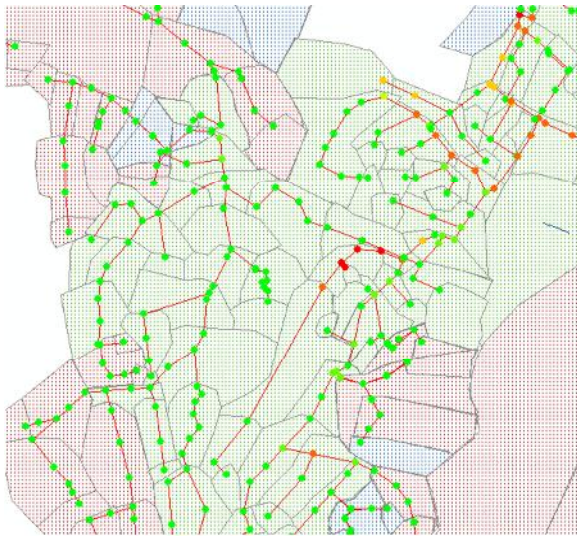
År	1 min.	2 min.	3 min.	5 min.	10 min.	15 min.	20 min.	30 min.	45 min.	60 min.	90 min.	120 min.	180 min.	360 min.
2	1.4	2.3	3.1	4.3	6.1	7.1	7.8	8.9	10	10.6	12.5	14.6	17.9	26.8
5	2	3.3	4.5	5.9	8	9.3	10.3	12.1	13.7	13.4	15.6	18.1	21.4	31.1
10	2.3	3.9	5.5	7	9.2	10.7	11.9	14.3	16.2	15.3	17.6	20.4	23.8	33.9
20	2.7	4.5	6.4	8	10.4	12.2	13.5	16.3	18.6	17.1	19.5	22.6	25.9	36.5
25	2.8	4.7	6.7	8.4	10.8	12.6	13.9	17	19.3	17.7	20.1	23.3	26.7	37.4
50	3.1	5.3	7.6	9.4	11.9	14	15.5	19	21.7	19.4	22	25.5	28.8	40
100	3.5	5.9	8.4	10.4	13.1	15.3	17	21	24	21.1	23.9	27.6	31	42.6
200	3.8	6.5	9.3	11.4	14.2	16.7	18.5	23	26.3	22.9	25.8	29.7	33.2	45.4

6.5 Systemets respons for utvalgte regn (1)

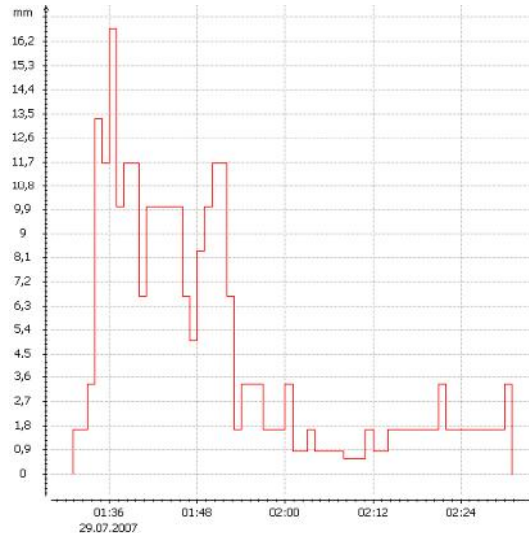
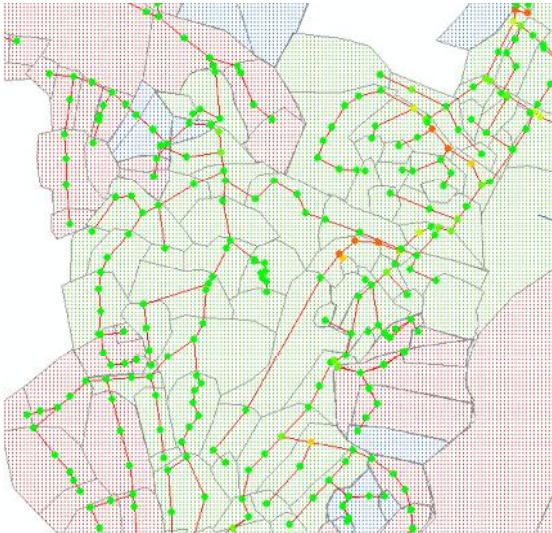
Figur 25 til Figur 29 viser resultatene for simulering av regn fra Tabell 14. Det er tydelig at responsen på regnhendelsene ikke kun er avhengig av gjentakintervall, men figurene av regnforløpet kan vise en sammenheng mellom formen på regn som simuleres, nedbørmengde og oppstuvninger.



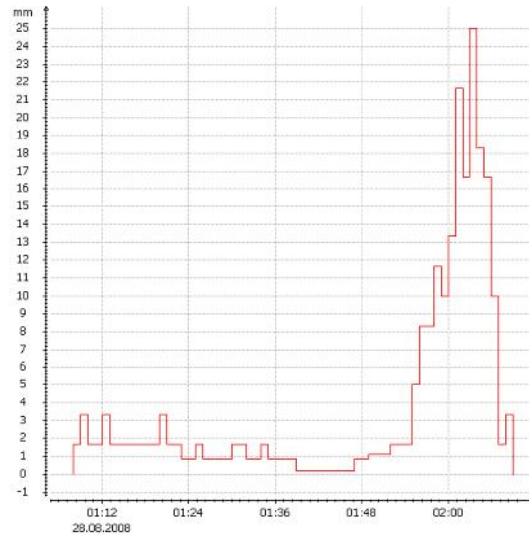
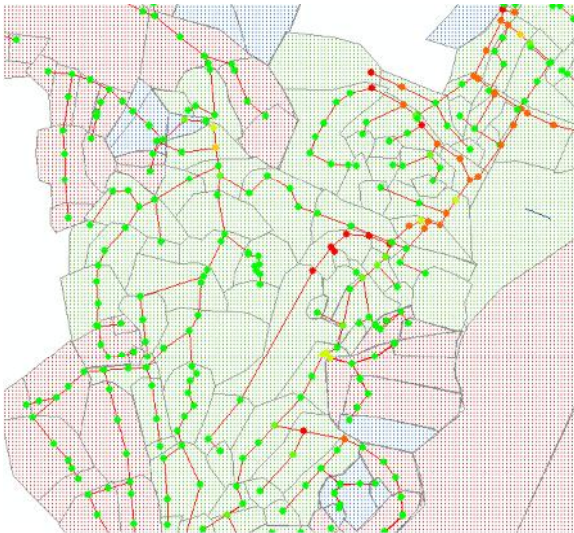
Figur 25: Systemets respons for overflateavrenning fra største regn innenfor 60 minutter i år 2002.



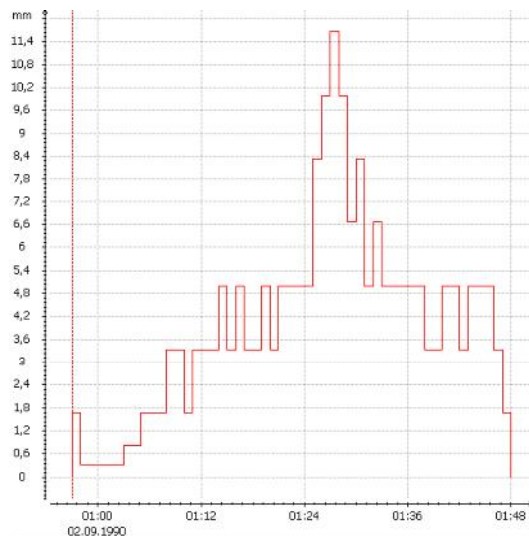
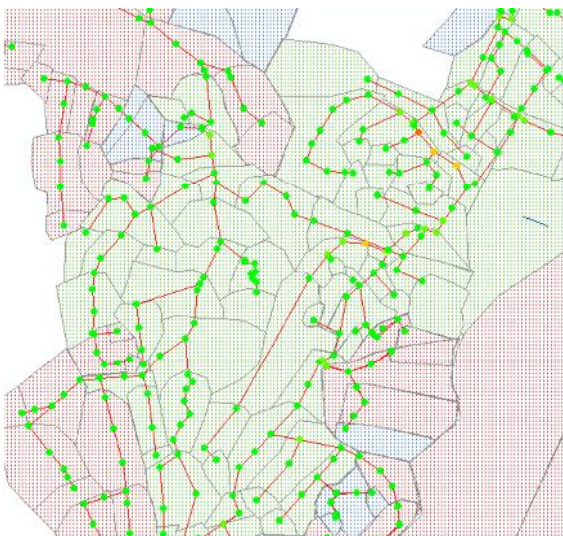
Figur 26: Systemets respons for overflateavrenning fra største regn innenfor 60 minutter i år 1987.



Figur 27: Systemets respons for overflateavrenning fra største regn innenfor 60 minutter i år 2007.



Figur 28: Systemets respons for overflateavrenning fra største regn innenfor 60 minutter i år 2008.



Figur 29: Systemets respons for overflateavrenning fra største regn innenfor 60 minutter i år 1990.

6.6 Utvelgelse av regnhendelser (2)

Midlertidig resultater fra kapittel 6.5 viser at utvelgelse av regn i henhold til metoden omtalt i kapittel 6.2 kan være for enkel eller ikke optimal for denne avløpsmodellen. Den finner regn med største nedbørsvolum i en time, men informasjon om viktige regnhendelser før og etter intervallet kan bli tapt i metoden som MATLAB-skriptet benytter, da metoden kan avkorte regnhendelsene betraktelig. Samtidig ble konsentrasjonstiden til de områdene oppstrøms de kritiske kummene i Figur 25 til Figur 29 grovt beregnet til å være langt mindre enn 60 minutter, noe som kan antyde at regnhendelser av kortere varighet er av større interesse.

Det ble da funnet hensiktsmessig å kunne benytte årsmaksimale regn i henhold til tidligere metode (kapittel 6.2), men med mulighet for å beholde data om eventuelle forregn og etterregn. Lengden på forregn og etterregn kan settes etter eget ønske, men på grunn av at feilsimuleringen ved bruk av tid-arealmetoden øker med simuleringslengde, bør total simuleringslengde begrenses til 120 minutter (pers. mld. Lindholm 2011). Regnutvelgelsen ble da endret til at de regnhendelser av interesse (kjerneregner) fikk en lengde på 15 minutter. Lengde på eventuelt forregn ble satt til maksimalt 55 minutter og etterregn maksimalt til 50 minutter. Årsmaksimale nedbørsmengde innenfor et tidsrom på 15 minutter er da den parameteren regnene blir valgt etter (se Vedlegg A: MATLAB-skript, gisData4.m).

Disse endringene ble da gjort for at:

- Utvalgte regn er valgt på grunnlag av maksimal total nedbørsmengde innenfor et intervall i størrelsesorden lik konsentrasjonstiden til flaskehalsen i systemet.
- Opprettholde informasjon om nedbørsforløpet i nabolidsrommet rundt utvalgte intervaller. Dette er et tiltak som skal forhindre at nedbørshendelsene blir avkortet, noe som kan gi en underestimert av regntilfellet.

De fem største regnhendelsene utvalgt etter disse kriteriene er vist i Tabell 16, og ved å sammenligne denne tabellen med Tabell 14, kan det tydelig sees at utvalgte regn, og rangering er blitt endret. Den største registrerte hendelsen er f. eks i august 2007, som er et meget kort sommerregn.

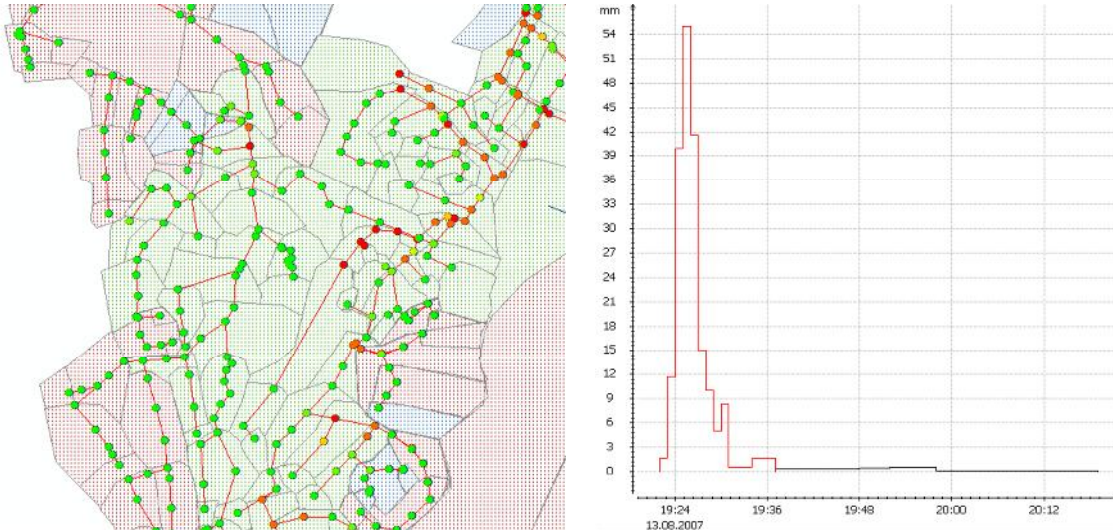
Tabell 16: De fem største årsmaksimum for nedbørshendelser innenfor 15 minutters intervall fra 1969 til 2009. Gjentakintervall (år) i parentes etter IVF-kurven.

År	Måned	Intervall			
		15 min	10 min	5 min	1 min
2007	8	11.7mm (10 - 20)	11.3mm (25 - 50)	9.9mm (50-100)	5.8mm (> 200)
2002	6	10.6mm (5 - 10)	7.8mm (2 - 5)	5.1mm (2 - 5)	3mm (25 - 50)
2008	8	10.5mm (5 - 10)	9.6mm (10 - 20)	6.3mm (5 - 10)	2.6mm (10 - 20)
2006	7	10mm (5 - 10)	8.7mm (5 - 10)	5.7mm (2 - 5)	2.3mm (10)
1987	9	9.2mm (2 - 5)	7.2mm (2 - 5)	4.6mm (2 - 5)	2.2mm (5 - 10)

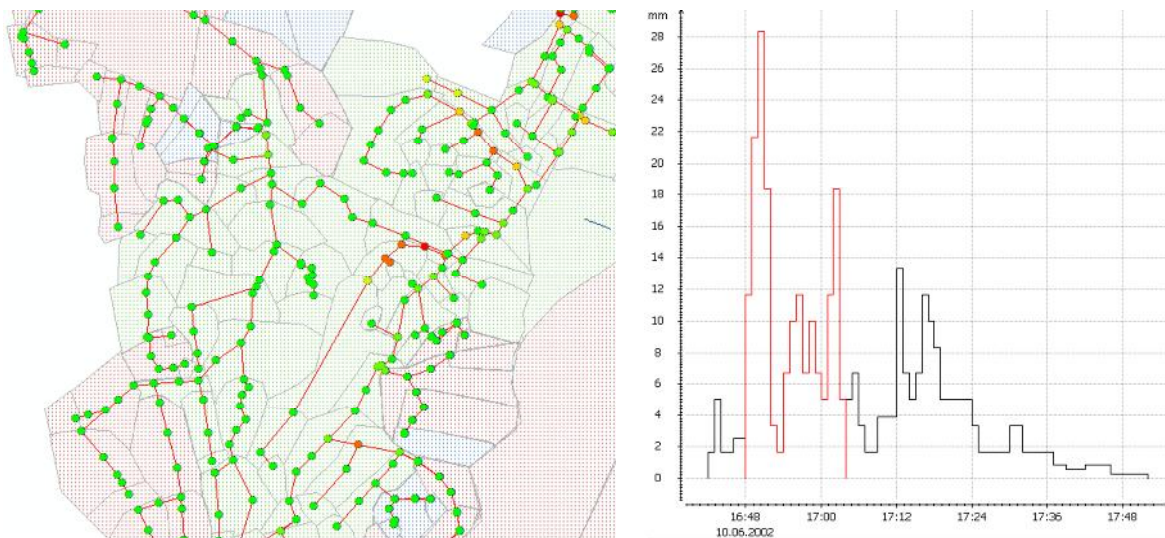
Tabell 16 er lagd etter samme fremgangsmåte som beskrevet i kapittel 6.4.

6.7 Systemets respons for utvalgte regn (2)

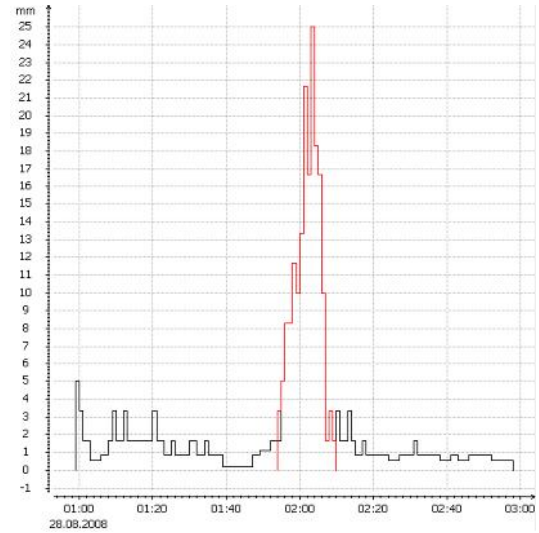
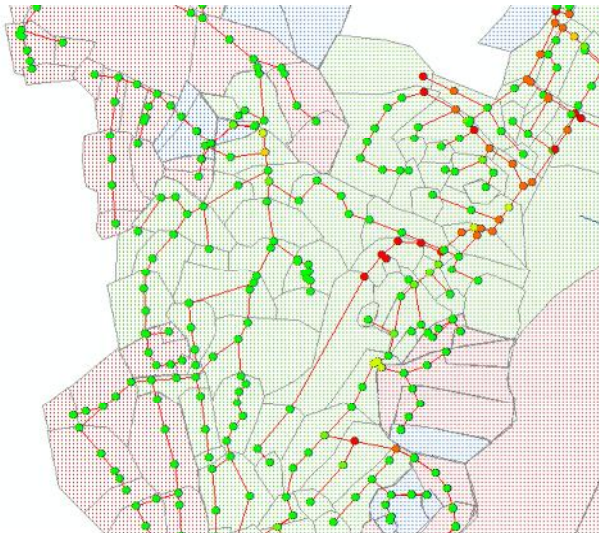
Av Figur 30 til Figur 34 ser man at den nye utvelgesmetoden velger regnhendelser som gir mer oppstuvning i kum enn tidligere metode (flere røde noder som representerer kummer). Samtidig er Figur 31 og Figur 32 et eksempel på at tidspunkt for toppregn er av overordnet betydning, da forregn vil gi mindre kapasitet til å transportere vann fra toppregnet. Regnene fra 1987 og 2008 kan da være egnet til å dimensjonere tiltak mot overløpsutslipp, kjelleroversvømmelser etc., og de har form som ligner på designregn som regnhyetogrammer.



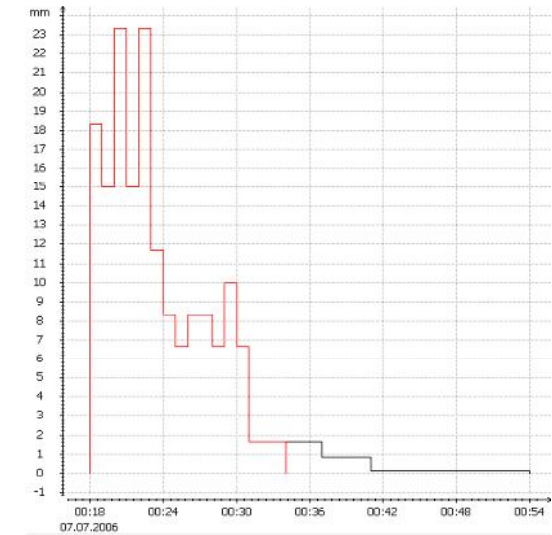
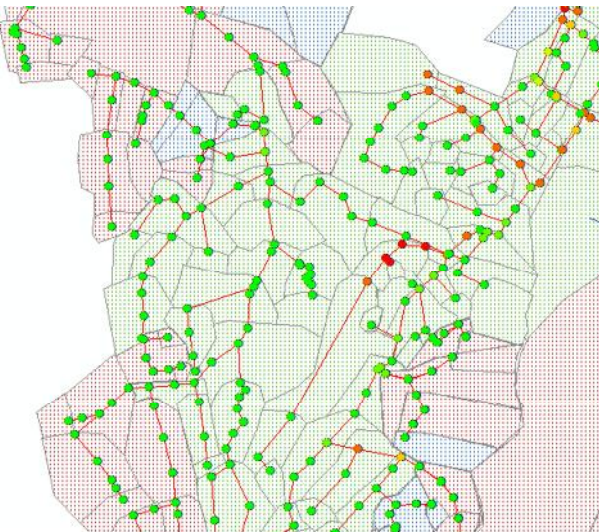
Figur 30: Systemets respons for overflateavrenning fra største regn innenfor 15 minutter i år 2007. Fra fremstillingen av regnet kan det sees at dette regnet hadde en meget kort varighet, med ingen "forregn" og neglisjerbart "etterregn".



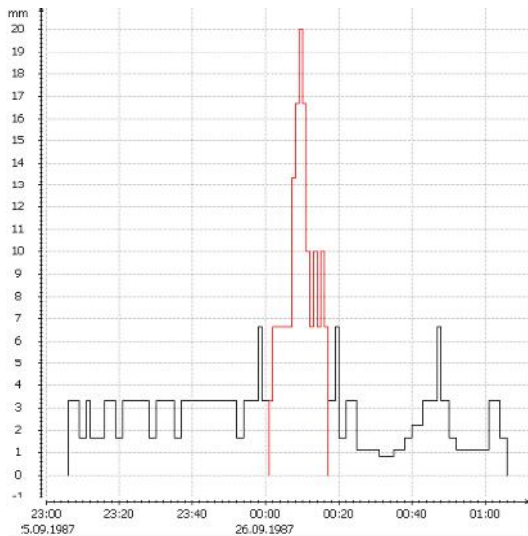
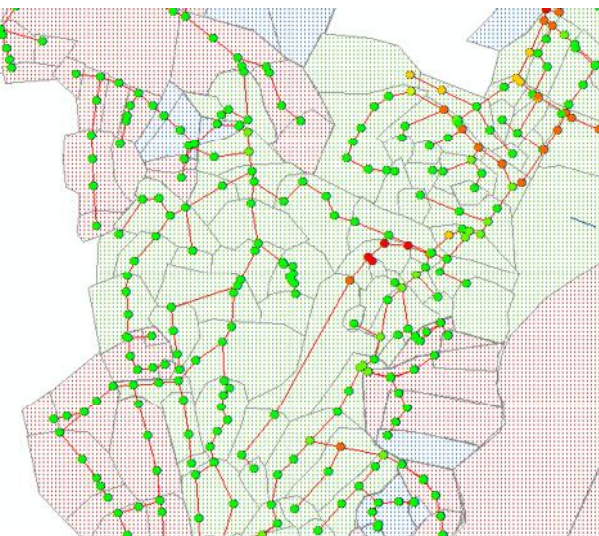
Figur 31: Systemets respons for hurtig avrenning fra største regn innenfor 15 minutter i år 2002, skravert opp med rødt. For- og etterregnet er tegnet med sort.



Figur 32: Systemets respons for overflateavrenning fra største regn innenfor 15 minutter i år 2008.



Figur 33: Systemets respons for overflateavrenning fra største regn innenfor 15 minutter i år 2006.



Figur 34: Systemets respons for overflateavrenning fra største regn innenfor 15 minutter i år 1987.

6.8 Parameteranalyse - følsomhetsanalyse

I kapittel 5.1, er det nevnt flere parametere som er med på å påvirke resultatet fra simuleringen. For den enkle hydrologiske modellen som er valgt benyttet er det fem feltparametere og fem hydrologiske parametere (inkludert "andel tette flater"). Av disse varierer følsomheten på modellresultatet og dette stiller dermed ulike krav til nøyaktighet i estimeringen av dem. Under følger det en kommentar om disse parameteres antatte påvirkning av modellresultatet, og følsomhetsanalyse for de to parameterne med antatt størst påvirkning av modellresultatet.

Overflatemagasinerings: Begrensete vannmengder deponeres på de tette flatene. Aktuelle verdier for parameteren er antatt å være små og denne har da liten påvirkning på simuleringsresultatet.

Hydrologisk tap: Fungerer som en "opsamlingsparameter" for en rekke andre parametere og skal korrigere for det vann som per definisjon skulle gå til rørnettet, men uteblir. Den er vanskelig å anslå fysisk, men kan antas å være korrelert med blant annet "bidragende tette flater". Evapotranspirasjonsbiten den skal dekke antas å være neglisjerbar for norske forhold og korte regn.

Tid-arealkurve: Feltene kan antas å passe best til rektangulær innstilling ved bestemmelse av tid-arealkurve. Allikevel kan en annen form være mer korrekt for noen delfelt, men denne effekten antas neglisjerbar i denne overordnede analysen.

Feltstørrelse: Denne avhenger av hvor nøyaktig feltgrensene kan bestemmes. Selve arealet regnes automatisk i GIS-programvare når feltgrensene er satt.

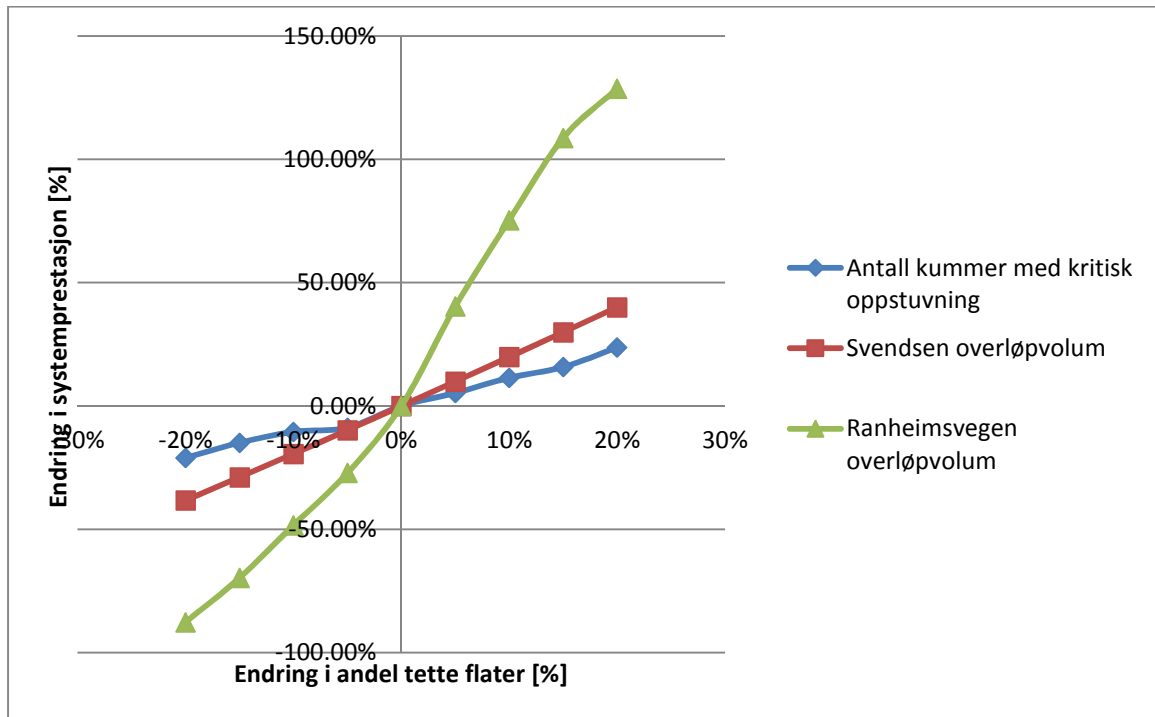
Annet avrenningsbidrag: Denne vil per definisjon avhenge av grunnvannsforhold, men ved korte regnhendelser om sommeren er det rimelig å anta denne som neglisjerbar i de fleste tilfeller.

Innbyggere: Innbyggertallet endrer seg over tid avhengig av demografiske forhold. I oversvømmelsessammenheng er personbidragene rimelig å anta som neglisjerbare i de fleste tilfeller.

Beliggenhet: Beliggenhet til delfeltet avhenger av kartkunnskap, men antas å kunne bestemmes nøyaktig med moderne utstyr. Det kreves allikevel stor kunnskap om avløpsnett og om hvor kummen kobles til nettet i modellen.

6.8.1 Andel tette flater

Dette er bidragende areal for denne modellen. Denne parameteren kan bestemmes etter et flyfoto eller reguleringsplan for området. Andel tette flater kan da avgjøres forholdsvis nøyaktig, men andel bidragende areal av disse tette flatene er det knyttet stor usikkerhet til. Det er slik at tette flater ikke betinget drenerer til et gatesluk eller dreneringsledning og inn i modellen. Dette er en parameter som kan antas å øke ved fortetting, og er da også da av interesse ved arealplanlegging for aktuelle områder.

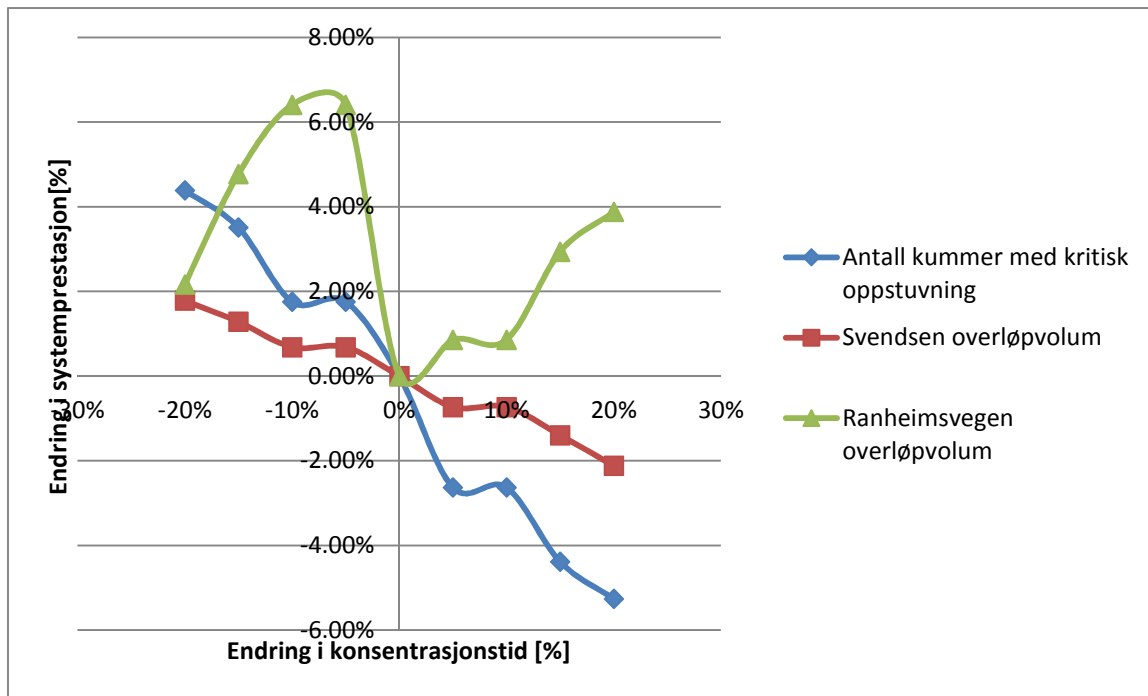


Figur 35: Analyse av modellens følsomhet for endring i andel tette flater.

I Figur 35 ser man at andel tilkoblet flater påvirker alle punktene som blir målt. “Antall kummer med kritisk oppstuvning” er en overordnet sjekk for hele systemets respons, mens volum i overløp for “Svendsen” og “Ranheimsvegen” er valgt for å gi bedre forståelse fra forurensningssituasjonen til Sjøskogbekken (se kapittel 7).

6.8.2 Konsentrasjonstid

Denne parameteren er avhengig av en mengde forhold i feltet og er vanskelig å fastsette eksakt. Den er blant annet avhengig av terrenghelning, terrengflassong, og overflatedekke (Chow et al. 1988) og blir i modellen satt til 7 minutter. Denne parameteren er antatt å ha betydning for avrenningen.



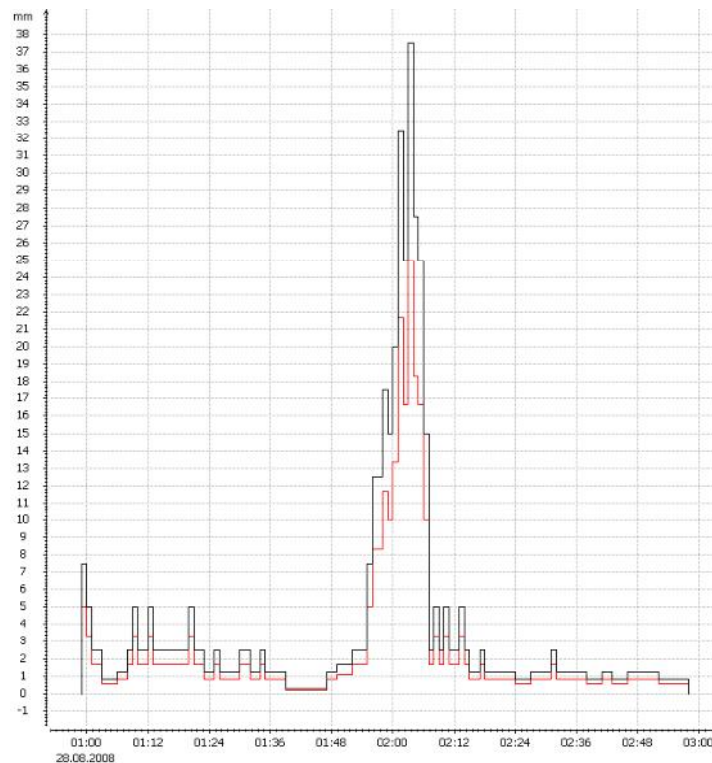
Figur 36: Analyse av modellens følsomhet for endring i konsentrasjonstid.

I Figur 38 ser vi at parameteren “konsentrasjonstid” ikke har samme intuitive respons i modellen som “andel tette flater”. For alle punktene gir modellen samme numeriske resultat ved -5 og -10 %, og ved 5 og 10 % endring i konsentrasjonstid. Simuleringen ble utført to ganger for å utelukke simuleringsfeil, og det er enda ikke på nåværende stadium bekreftet årsak til at den numeriske løsningsmotoren i MOUSE gir eksakt like resultater i disse tilfellene.

6.9 Sårbarhetsanalyse for klimaendringer

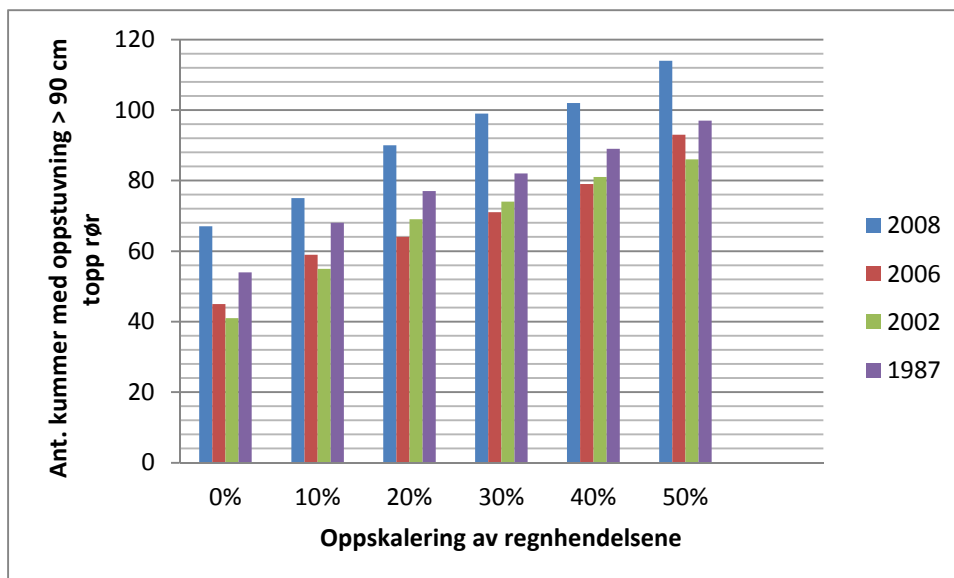
For regnene valgt ut etter metoden beskrevet i kapittel 6.6, følger det av resultatene fra DCF-analysen i kapittel 6.1 at regnene er forventet å øke med 25 til 36 % avhengig av sesong (sommer eller høst) og klimascenario. Etter forslag beskrevet i Nilsen (2008) ble det vurdert hensiktsmessig å gjøre en sensitivetsanalyse for parameteren regnintensitet, istedenfor å vurdere systemets sårbarhet for klimaendringer etter én klimafaktor gitt av et dynamisk modellsett og DCM. På denne måten vil ikke denne analysen gjøre for grove antakelser angående fremtidig klima, men lar da oppgaven av å bestemme dimensjoneringskriteriet være opp til beslutningstakerne.

Intensiteten til regnene utvalgt i kapittel 6.6 (se Tabell 16) ble da valgt til å skaleres med 10, 20, 30, 40 og 50 %, og den følgende analysen vurderer da systemets sårbarhet ovenfor økt intensitet ved de største sommerhendelsene. Utvalgt regn for 2008 er vist i Figur 37, der hvor hele regnhendelsen er oppskalert for å visualisere effekten av homogen skalering av regnintensitet. Analysen ble ikke gjennomført for regnhendelsen for 2007, da denne ble vurdert som meget ekstrem.



Figur 37: Skalering opprinnelig regn fra 2008 (rød) til 50 % + intensitet (sort). De andre skaleringsfaktorene er utelatt på grunn av visuell presentasjon.

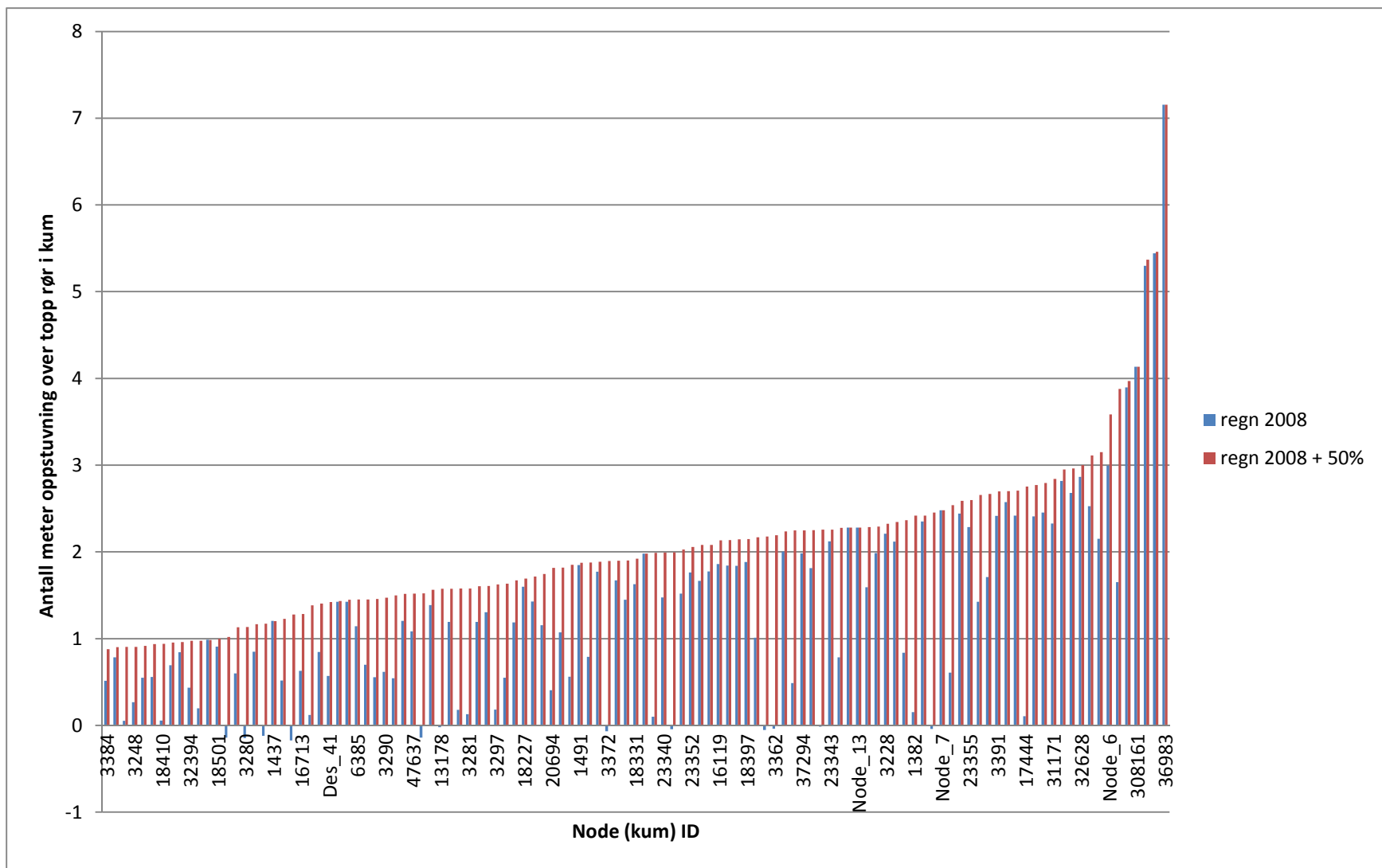
Selve følsomhetsanalysen ble basert på en relativt grov og generell parameter, hvor systemets prestasjon (skadeomfanget) ble målt på antall kummer med oppstuvning over 90 cm topp rør. Dette er en parameter som egner seg til å gjøre vurderinger av hele systemet og ikke til detaljplanlegging.



Figur 38: Antall kummer med oppstuvning mer enn 90 cm over topp rør for utvalgte regn med skalering av regnhendelsene.

Av Figur 38 ser man at de fire valgte regnene fører til en økning i antall kummer med kritisk oppstuvning ved skalering av nedbørintensitet. Dette betyr da at et kraftigere fremtidig sommerregnregime har potensial for at flere områder kan få kjelleroversvømmelser. Prosentvis økning i antall kummer med oppstuvning mellom de opprinnelige regnene og 50 % skalering er på mellom 70 og 110 % avhengig av regn.

I Figur 39 vises endring i oppstuvning ved klimaskalering av regnet valgt fra 2008. Det er stor variasjon mellom oppstuvning ved regnene for ulike kummer, og figuren viser eksempel på kummer som både har kritisk nivå ved begge tilfeller, men også kummer som får kritisk oppstuvning på grunn av klimaskaleringen.



Figur 39: Oversikt av endring i oppstuvning for kummer med oppstuvning over 90 cm topp rør ved 50 % skalering av 2008 regnet.

7 Tiltak for sanering av Sjøskogbekken i Trondheim kommune

7.1 Bakgrunn

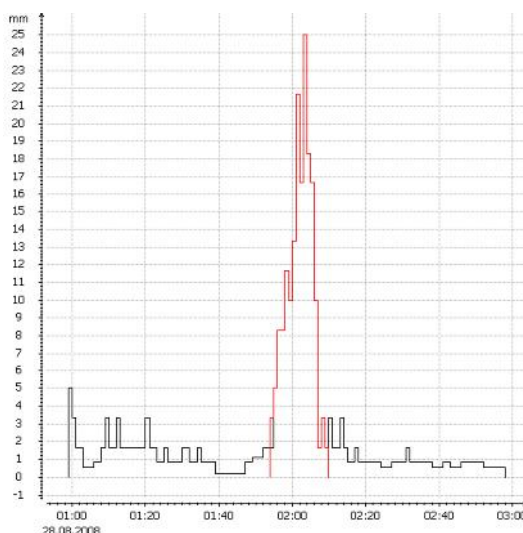
Sjøskogbekken er i dag resipient for to overløp. Bekken egner seg dårlig til å ta i mot vann fra overløp i fellessystemet, da den er nær bebyggelse og bekkens resipientkapasitet er dårlig. I nedre del av bekkeløpet planlegger Hovdenak (2011) badeplass og egnet rekreasjonsområde for mennesker, og det er da av overordnet betydning å sikre badevannkvalitet i bekkefarene i sommersesongen. Dette vil sikre at planlagt areal har den funksjonen som blir tiltenkt.

7.2 Forutsetninger

Ved simulering av overløpsutslipp bør langtidssimuleringer benyttes, men det er ikke mulig å gjennomføre på nåværende tidspunkt. Det forutsettes da at valgte dimensjonerende regnhendelse vil gi et dimensjoneringsgrunnlag som kan anses som sanitært trygt for badende i sommersesongen.

7.2.1 Dimensjonerende regnhendelse:

Ved valg av dimensjonerende regnhendelse ble det valgt et regn med lignende form som tradisjonelle regnhyetogrammer.



Figur 40: Dimensjonerende regnhendelse fra august måned i 2008. Regndata er hentet fra Risvollan nedbørmåler på eKlima.no.

Det valgte regnet har statistiske egenskaper vist i Tabell 17 under.

Tabell 17: Gjentakintervall for valgte regnhendelse. Gjentakintervall (år) i parentes etter IVF-kurven.

År	Måned	Intervall						
		60 min	30 min	20 min	15 min	10 min	5 min	1 min
2008	8	13.7mm (5 – 10)	11.9mm (2 – 5)	11.2mm (5 – 10)	10.5mm (5 – 10)	9.6mm (10 – 20)	6.3mm (5 – 10)	2.6mm (2 – 5)

Dette er et regn som kan betegnes som relativt “strengt” ved dimensjonering av overløp. Ved å se i tabellen kan f. eks et ti minutters regn plukkes ut med gjentakintervall på mellom ti og 20 år. Men andre utvalgte intervaller kan ha gjentakintervallet på to til fem år. Styrken på dette regnet har også

blitt skalert med 30 % etter analysen gjort i kapittel 6.1, for å kunne ta høyde for endret intensitet på sommernedbør på grunn av fremtidige klimaendringer.

Oslo kommune har som mål at deres overløp skal være i funksjon en gang per femte år (pers. mld. Kristiansen 2010). Det antas da at valgte regnhendelse vil føre til dimensjonering i henhold til minimum samme funksjonskrav som Oslo kommune stiller.

7.2.2 VA-systemet:

Det forutsettes at vannkvalitet i bekken kun forringes i badesesongen ved at overløpene Sv. Svendsen og Ranheimsvegen trer i drift. Avløpsnettet kan ha lekkasjer ut i bekken, men dette er ikke en del av denne saneringsplanen. Ranheimsfjæra overløp har fjorden som resipient.



Figur 41: Oversikt over aktuelle overløp for Sjøskogbrekken.

7.3 Tiltak for å hindre overløpsutslipp fra Sv. Svendsen

Det ble implementert et fordrøyningsbasseng rett oppstrøms overløpet Sv. Svendsen. Bassenget som ble modellert hadde sylindrisk form med ti meter i diameter og høyde på 1,7 meter. Dette skulle gi et fordrøyningsvolum på ca. 140 kubikkmeter.

Kostnader for tiltaket: Ca. 1 000 000 NOK.

7.4 Tiltak for å hindre overløpsutslipp fra Ranheimsvegen

Det ble simulert et fordrøyningsbasseng rett oppstrøms vest for overløpet Ranheimsvegen. Bassenget som ble modellert hadde sylindrisk form med syv meter i diameter og høyde på 0,8 meter. Dette skulle gi et fordrøyningsvolum på ca. 31 kubikkmeter.

Overløpsterskelen i Ranheimsfjæra ble senket med 15 cm, for å forhindre at for store mengder vann blir videreført fra Ranheimsfjæra og renner ut i overløpet ved Ranheimsvegen. Dette tiltaket alene fører til at mer vann går i overløp fra Ranheimsfjæra og ut i fjorden, men tiltaket for Sv. Svendsen har betydelig positiv effekt på vannmengder ut av Ranheimsfjæra overløp, slik at systemet sett under ett vil prestere betydelig bedre i alle overløpene.

Kostnader for tiltaket: Ca. 700 000 NOK.

8 Diskusjon

8.1 Metodikk

Som nevnt i kapittel 6 måtte det benyttes en "avkortet" versjon av den hydrologiske modellen, da det ikke var tid til langtidssimulering med RDII modulen. Dette gjorde at analyse av situasjoner som blant annet regn på frossen mark og snøsmelting ikke kunne gjennomføres. Dermed ble sårbarhetsanalysen kun delvis, hvor regnhendelser i sommermånedene kunne best simuleres. På den annen side, vil RDII modulen og LTS innføre en rekke usikkerhetsmomenter, startparametere som magasinifylling etc. og samtidig kreve stedlige temperatur- og evaporasjonsdata.

Ved kalkulering av DCF for å kunne kvantifisere effekten av eventuelle klimaendringer er det betenkelig hvilken nytte resultatet fått i kapittel 6.1 innehar i en beslutningssituasjon. Det er allerede produsert tilsvarende resultater fra ensemble av klimamodeller, hvor usikkerheten av klimamodellene blir tydeliggjort i spredningen i resultatene. På den annen side må man ved dimensjonering bestemme seg for en verdi, og da kan f. eks midlere resultater fra et ensemble benyttes. Fordelen med klimamodellen benyttet, er at den er løst spesielt for et område geografisk nær avløpsmodellen som betraktes.

DCF-metoden benyttet i denne oppgaven baserer seg på en meget enkel form, med en fundamental antakelse om at endringen i intensiteten for korte nedbørstilfeller er lineært avhengig av endring i nedbørsum per sesong for et gitt område. Det kan diskuteres hvorvidt det er rimelig å anta dette, men dette gjelder for selve DCF-tankemåten i større eller mindre grad (Nilsen 2008). Metoden benyttet her er valgt fordi den krever en lav inngangsterskel i å hente data (kun Excel) og data benyttes kun på sesongvis grunnlag. Dette er aggregerte data, og det ble funnet hensiktsmessig å ikke lese for mye ut av dataene fra klimamodellene, som det er knyttet stor usikkerhet til.

Ved utvelgelse av regnhendelser (kapittel 6.2 til 6.6) kan det være mer hensiktsmessig å velge regn etter historiske hendelser, der hvor ledningsnettene er gamle og oversikt over eventuelle skader finnes. Da er det mindre bruk for programskript som leter igjennom regndata for "å gjette" på regnhendelser som forårsaker skade i avløpssystemet. Disse opplysningene viste seg allikevel å være vanskelig tilgjengelig under arbeid med denne oppgaven, og programskriptet ble også benyttet til å finne regnhendelser for et helt nytt nedbørsfelt et annet sted i Norge. I selve arbeidet med å optimalisere metoden for å finne regn som forårsaker skader, ble forbedringen fra kapittel 6.2 til kapittel 6.6 tolket til at siste metode var god nok (ved en LTS analyse vil et slikt utvelgesskript ha mindre betydning uansett). Det kan allikevel ikke utelukkes at det finnes bedre metoder for å velge ut de mest ekstreme regnene. Metoden leverer også per definisjon ikke alle de verste regnene, se diskusjonen om årlig maksimum i kapittel 6.2.

Ved den statistiske analysen av regnene (se kapittel 6.4) ble den statistiske analysen redusert til å sammenligne nedbørsummer for tidsintervallene med IVF-datasettet. Dette ble gjort for å sikre at gjentakintervallene ble regnet ut etter meteorologiske metoder. Det ble allikevel forsøkt utført en ekstremanalyse i R¹⁵, men resultatene ble vurdert til å tilføre lite til IVF-analysene produsert av MI, samt at forfatteren ikke kunne garantere for at statistisk metode var gjennomført korrekt.

¹⁵ R er et gratis statistikkprogram.

I kapittel 6.9 hvor det ble utført en sårbarhetsanalyse for klimaendringer, ble oppstuvning over 90 cm topp rør benyttet til å måle systemets respons for konstant skalering av utvalgte regn. Denne parameteren ble valgt da den måler hele systemet, og krever lav arbeidsmengde å beregne. Ulempen ved å måle på denne parameteren er at den i sin ubearbeidede form er av forholdsvis liten interesse i en beslutningssituasjon, da det er skader som følger av regnhendelsen som er sentralt. Dette kommer av at parameteren i nåværende form overestimerer "skade", da det ikke er korrigert for forhold som hindrer oversvømmelse i kjeller. Hardang (2007) målte sårbarhet for klimaendringer på antall hus tilkoblet kritiske kummer, noe som er et nærmere mål på skade. I tillegg er det tvil om avstanden 90 cm over topp rør er korrekt, da det er rimelig å anta at flere boliger er bygd etter eldre standarder, hvor annen høydeforskjell mellom avløpssystem og kjellergulv var standard.

8.2 Videre arbeid

I denne oppgaven er det flere momenter som er kandidater for videre arbeid og sammenligning med resultater gitt av dette arbeidet.

Et viktig moment vil være å korrigere resultatene fra kapittel 6.9 slik at sårbarhet for klimaendringer måles i skade påført hus, infrastruktur og miljø. Ved f. eks å omforme antall kummer om til antall boliger i fare for kjelleroversvømmelse, vil skadeomfanget kunne bli beskrevet mer nøyaktig. Det kan også være hensiktsmessig å lokalisere særskilt viktige installasjoner i en sårbarhetsanalyse for klimaendring eller fortetting og lagre dette i kartverksdatabaser.

Utvelgelse av regn etter kun nedbørsum vil gi et avkortet utvalg av hendelser som har potensial for skade. Det bør utarbeides et skript som finner hendelser som f. eks snøsmelting og regn samtidig. Utvelgelsen kan da anta at regnhendelser etter kuldeperioder gir snøsmeltebidrag til modellen, gitt at forholdene tilsier at det er snø på bakken.

Alternativt kan det være interessant å gjennomføre en helhetlig langtidssimulering med RDII-modulen. Denne metoden vil kunne identifisere flere regnhendelser som fører til skade på hus og infrastruktur, enn regn utvalgt etter metoden benyttet i denne oppgaven. Ved å utføre en DCF-metode (som f. eks Nilsen (2008)), og endre regnene og temperaturdata etter klimaendringer som måtte antas, vil et mer komplett bilde av sårbarhet for klimaendringer kunne dannes. Dette krever på den annen side langt lengre tid til simulering.

Det kan dessuten være interessant å gjøre en effektivitetsanalyse på kommunenes VA-sektorer, hvor det kan gjøres en DEA¹⁶- eller SFA¹⁷-analyse som måler aktørenes kostnads- og servicenivå. NVE utfører slike analyser for Nettselskapene (EL), og disse analysene setter grunnlag for blant annet nettleie som kraftbransjen opererer med. Kraftleverandører og VA-sektoren har de samme markedsforholdene, og forholdene for funksjon og drift varierer stort innenfor begge bransjer. Dette gjør at analyser gjort for nettselskapene kan være foregangsmodell for VA-sektoren. Slike analyser er dog et annet bord, men kan være en alternativ angrepsmåte for å forbedre den samfunnsøkonomiske effektiviteten til VA-sektorene.

¹⁶ DEA står for "Data Envelopment Analysis", som benytter lineær programmering for effektivitetsanalyser (Coelli 2005).

¹⁷ SFA står for "Stochastic Frontier Analysis", som benytter økonometrisk teori for effektivitetsanalyser (Coelli 2005).

9 Konklusjoner

Avløpssystemet viste seg sårbart for korte intense regn, da flaskehalsen oppdaget i systemet har bidragende arealer med kortere konsentrasjonstider.

Utvalgte regn, som av IVF-kurven kan antas som mildere enn dimensjoneringsgrunnlaget, skaper oppstuvning i kummer. Disse regnene kan gi oversvømmelser av installasjoner knyttet til avløpssystemet. Gitt at det ikke har blitt gjort andre tiltak mot kjelleroversvømmelse i nettet, kan dette tyde på at dimensjoneringskriteriet ikke blir tilfredsstillende i dag når regnene har «ugunstig form».

Påvirkningen klimaendringer gir på regnintensiteten ble forsøkt estimert med en enkel DCF-metode, men resultatet ble funnet å ha liten betydning på grunn av usikkerhetene knyttet til estimatet. Allikevel ble dette estimatet benyttet som "en beste gjetning" ved dimensjonering av tiltak for å hindre overløpsutslipp i Sjøskogbekken.

Systemet vil være sårbart for en økning i intensiteten for sommerhendelsene, som følge av eventuelle klimaendringer, og en gitt skalering av intensiteten medførte at progressivt flere kummer fikk kritisk oppstuvning. Denne skaleringsanalysen er ikke en fullverdig erstatning for en komplett klimaanalyse, men på grunn av at nåværende klimaforskning er umodent angående regnhendelser kritiske for urbane avløpssystemer, er den vel så informativ som sofistikerte metoder bygget på en rekke antagelser.

Ved en detaljert analyse fra oppstuvning i kum, må enhver kum vurderes for å ivareta kummenes unike følsomhet for endringer i grensebetingelser.

Vannkvaliteten i Sjøskogbekken må forbedres om bekken skal kunne benyttes som et rekreasjonsområde. Utslipp fra to overløp ble identifisert, og tiltak for å hindre overløpsutslipp i sommersesongen ble foreslått.

10 Referanser

- Akan, A. O. & Houghtalen, R. J. (2003). *Urban hydrology, hydraulics, and stormwater quality: engineering applications and computer modeling*. Hoboken, N.J.: Wiley. XVI, 373 s. s.
- Arnell, N. (2002). *Hydrology and Global Environmental Change*. Essex: Pearson Education Limited.
- Brennan, T. J. (1989). Regulating by Capping Prices.
- Buchdal, J. & Hare, S. (2000). *The Encyclopedia of Atmospheric Environment: Atmosphere, Climate & Environment Information Programme*. Tilgjengelig fra: <http://www.ace.mmu.ac.uk/eae/english.html> (lest 24. januar).
- Bøyum, Å. & Thorolfsson, S. (2001). *VA-teknikk del 2 Avløp*. VA-teknikk: Tapir Akademiske Forlag.
- Chow, V. T. (1964). *Handbook of Applied Hydrology*: McGraw-Hill.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. Water Resources and Environmental Engineering: McGraw-Hill.
- Coelli, T. (2005). *An Introduction to efficiency and productivity analysis*. New York: Springer. XVII, 349 s. s.
- DANVA. (2007). *En kokebog for analyser af klimaændringenes effekter på afløbssystemer - Med fokus på oversvømmelser*. F&U Rapport nr. 5. København.
- Davies, E. G. R. & Simonovic, S. P. (2005). CLIMATE CHANGE AND THE HYDROLOGICAL CYCLE.
- DHI. (2008a). MOUSE LTS. *User Guide*.
- DHI. (2008b). MOUSE RDII. *Reference Manual*.
- DHI. (2008c). MOUSE PIPE FLOW. *Reference Manual*.
- DHI. (2008d). MOUSE RUNOFF. *Reference Manual*.
- Dingman, S. L. (2002). *Physical hydrology*. 2 utg. New Jersey: Prentice Hall.
- Evans, E., Ashley, R., Saul, A., Sayers, P., Thorne, C. & Watkinson, A. (2004). Foresight Future Flooding.
- ExFlood. (2010). Extreme weather in small catchments: new method for flood protection.
- FNH. (2009). Naturskader - antall og anslått erstatning. Tilgjengelig fra: www.fnh.no.
- Forskningsrådet. (2010). *Norges nasjonale klimaforskningsprogram - Klimaendringer og konsekvenser for Norge - NORKLIMA*.
- Hanssen-Bauer, I., Drange, H., Førland, E. J., Roald, L. A., Børsheim, K. Y., Hisdal, H., Lawrence, D., Nesje, A., Sandven, S., Sorteberg, A., et al. (2009). *Klima i Norge 2100. Bakgrunnsmateriale til NOU Klimatilpasning*. Oslo: Norsk klimasenter.
- Hardang, H. (2007). *Analyse av virkninger av klima på flomskader og overløpsutslipp i Veumdalen, Fredrikstad*. Ås: UMB, IMT.
- Holvik, I. S. (2010). *Impact of storm water runoff from climate change. Example study in Sandnes, Norway*. Trondheim: NTNU, Department of Hydraulic and Environmental Engineering.
- Hovdenak, O. E. (2011). *Sjøskogbekken: fra problem til ressurs. En oppgave om håndtering av overflatevann*. Ås: UMB.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Iversen, T., Benestad, R., Haugen, J. E., Kirkevåg, A., Sorteberg, A., Debernard, J., Grønås, S., Hanssen-Bauer, I., Kvamstø, N. G., Martinsen, E. A., et al. (2005). *Norges klima om 100 år Usikkerheter og risiko*.
- KRD. (2003). *Retningslinjer for beregning av selvkost for kommunale betalingstjenester*. regionaldepartementet, K.-o. Oslo.
- Kristiansen, P. (2010). *Gjentaksintervall for overløpshendelser i Oslo kommune*. Oslo.
- Leiar, O. F., Bardalen, A., Gjærum, I., Hovelsrud, G. K., Nyeggen, E., Petkovic, G., Aanestad, J., Dalen, L., Hanssen-Bauer, I., Karlsen, J., et al. (2010). *Tilpassing til eit klima i endring*. Oslo.
- Lindholm, G. (2011). *Maksimal lengde på simulering ved bruk av kun tid-arealmetoden i MOUSE*. Oslo.
- Lindholm, O., Nie, L. & Bjerkholt, J. (2007). *Klimaeffektens betydning for oppstuvninger og forurensningsutslipp fra avløpssystemer i byer. IMT-Rapport 16/2007*.

- Lindholm, O., Endresen, S., Thorolfsson, S., Sægvog, S., Jakobsen, G. & Aaby, L. (2008). Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering. *Rapport 162*. Hamar: Norsk Vann.
- Lindholm, O., Bjerkholt, J. & Nie, L. (2009). Klimaeffekters betydning for oppstuvninger og forurensningsutslipp fra avløpssystemer i byer. *IMT-Rapport 32/2009*. Ås.
- Miljøstyrelsen. (2007). Klimatilpasning af afløbssystemer og metodeafprøvning. Økonomisk analyse.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grubler, A., Jung, T. Y., Kram, T., et al. (2000). *Summary for Policymakers: Special Report on Emissions Scenarios : a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Nilsen, V. (2008). *Urban drainage in the face of climate change: adaptation of regional climate model output for rainfall-runoff simulations in Oslo, Norway*. Ås: [V. Nilsen]. V, 82 bl. s.
- NORVAR. (2004). Etterutdanningskurset "Reduksjon av oversvømmelser - Planlegging, dimensjonering, drift og vedlikehold av overvanns- og avløpsnett". Hamar.
- NOU. (1997). *27 Nytte-kostnadsanalyser Prinsipper for lønnsomhetsvurderinger i offentlig sektor*. tolldepartementet, F.-o. Oslo.
- Posner, R. A. (1974). Theories of economic regulation.
- RIF. (2010). State of the Nation. I: Forening, R. I. (red.).
- Roald, L. A., Beldring, S., Skaugen, T. E., Førland, E. J. & Benestad, R. (2006). Climate change impacts on streamflow in Norway. I: Roald, L. A. (red.). *Oppdragsrapport A*.
- SNL. (2011). *Økonomisk levetid*. I: Leksikon, S. N. (red.). Tilgjengelig fra: http://www.snl.no/økonomisk_levetid (lest 22.02).
- Tollan, A. (2002). *Vannressurser*. Oslo: Universitetsforlaget AS.
- Trondheim-Kommune. (2008). VA - Norm Beregning av overvannsmengde og dimensjonering av ledning. Vedlegg 5.
- VANN200. (2009). *Forelesning i det hydrologiske kretsløp ved UMB*. Tilgjengelig fra: http://homepages.ius.edu/PGALVIN/climate/wind_files/Winds2.jpg.
- Vatten, S. (2007). *Klimatförändringarnas inverkan på allmänna avloppssystem*. Underlagsrapport till Klimat- och sårbarhetsutredningen. Stockholm.
- Vegdirektoratet. (2011). *Håndbok 018 Vegbygging (normaler)*.
- Watt, E. W., Waters, D. & McLean, R. (2003). Climate Change and Urban Stormwater Infrastructure in Canada: Context and Case Studies. *Toronto-Niagara Region Study on atmospheric change and Working Paper Series*. Waterloo: Meteorological Service of Canada.

11 Vedlegg A: MATLAB-skript

MATLAB-skriptene benyttet for å velge regndata i denne oppgaven kan fritt benyttes av andre som har behov for å løse denne utfordringen ved ubetalt arbeid og oppgaveskriving. MATLAB finnes på flere datasaler ved Høyskoler og Universiteter i Norge.

Det anbefales å dedikere en egen mappe til alle skriptene, hvor mappeinnholdet burde se slik ut:

MAPPE:

Gis	(mappe til resultatfilene)
Data.txt	(regndata fra eKlima)
analyse.m	(MATLAB-skript)
lesDatafil.m	(MATLAB-skript)
nedbor.m	(MATLAB-skript)
gisData.m	(MATLAB-skript)
gisData2.m	(MATLAB-skript)
gisData4.m	(MATLAB-skript)

For Data.txt filen er det essensielt at filen kun har datalinjer. Identifikasjonshodet som blir generert av eKlima må da slettes manuelt før skriptene kjøres.

I analyse.m kan lengde på kjerneregn settes (intervall) og dette vil da være tidsrommet man regner årsmaksimal nedbørsum for. Lengden på forregn og etterregn kan også settes etter eget ønske. Skriptet er henholdsvis delt i to celler, hvor første celle kjører funksjonen "lesDatafil", som gjør at lesDatafil.m kjøres. Denne cellen må kjøres først. Ved kjøring av andre celle vil et sammendrag av de største regnene per år lagres i en MATLAB matrise med navn maksPerAar. Dette sammendraget lagres ikke når MATLAB lukkes, men må eksporteres for hånd til Excel eller lignende programvare.

Skriptene gisData.m, gisData2.m og gisData4.m lagrer data i mappen Gis. Filnavnene blir i henhold til skriptene regn_stasjonsnummer_år.txt, regn_stasjonsnummer_år_long.txt og regn_stasjonsnummer_år_long2. Disse filene er da på et format som kan legges inn som en grensebetingelse i ROSIE. Innstillinger for disse grensebetingelsene skal da være:

- Data type -> "Rainfall"
- File format -> "Temporal Analyst ASCII files"
- File data type -> "Rainfall Intensity"
- File data unit -> "mu-m/s"
- Value interpretation type -> "Mean_Step_Accumulated"

11.1 analyse.m

```
%% Lese datafil til funksjonen "lesDatafil"  
% kjøring: Ctrl+Enter  
lesDatafil('data.txt')  
%% Produsere regn som gir maksimal nedbørmengde innen ønsket intervall  
  
l = ls('regn_*.mat')  
  
s = size(l,1)  
  
i = 1;  
for i = 1 : s  
    filnavn = l(i, 1:end-4);  
    utfilnavnstamme = ['gis/' filnavn ]  
    utfilnavn = [utfilnavnstamme '.txt' ];  
    intervall = 15 ; % minutter  
    forregn = 55 ; % minutter  
    etterregn = 50 ; % minutter  
    [timesregn maksregn maksregnindex detaljer] = nedbor(filnavn, intervall, forregn, etterregn);  
    gisData(detaljer, maksregnindex, utfilnavn );  
    maksPerAar(i,:) = maksregn ;  
  
    utfilnavnlong = [utfilnavnstamme '_long.txt' ];  
    gisData2(detaljer, maksregnindex, utfilnavnlong);  
  
    utfilnavnlong = [utfilnavnstamme '_long2.txt' ];  
    gisData4(detaljer, maksregnindex, utfilnavnlong);  
end  
  
maksPerAar
```

11.2 lesDatafil.m

```
function ant_feil = lesDatafil(fil)

fid =fopen (fil, 'r');

i = 0;
forrige_aar = 0;
aar = 0;
ant_feil = 0;
matrise = zeros(1,7);
while 1
    i = i +1;
    linje= fgetl(fid);

    % avslutter løkka hvis eof, kilde matlabmanual
    if ~ischar(linje), break, end

    % trimmer strengen
    linje = strtrim(linje);

    datostart = findstr ( ' ', linje );
    d = datostart(1) + 1 ;

    stasjon  = str2num(linje(1 : datostart-1 ));
    aar      = str2num(linje(d : d+3));
    maaned   = str2num(linje (d+5 : d+6));
    dag      = str2num(linje (d+8 : d+9));
    time     = str2num(linje (d+11 : d+12));
    minutt   = str2num(linje (d+14 : d+15));
    regn     = str2num(linje(d+16 : end));

    % Setter ufullstendige målinger til 0
    if (size(regn) == 0 )
        ant_feil = ant_feil+1;
        regn = 0;
    end

    % setter negative målinger til 0
    if (regn < 0 )
        ant_feil = ant_feil+1;
        regn = 0;
    end

    if (aar ~= forrige_aar)
        if (forrige_aar ~= 0 )
            % lagrer data fra forrige år
```

```

    lagre = ['save('' filnavn '', '' filnavn '');'];
    eval(lagre);
    clear (filnavn); % fjerner variabelen fra minne
end
teller = 0;
filnavn = ['regn_' num2str(stasjon) '_' num2str(aar)]
end

forrige_aar = aar;
teller = teller + 1;
if ( time == 24 && minutt ~= 00)
    time = 0;
end

% oppretter matrise, lagrer matrisen i .mat format
if (regn ~= 0 )
    m = [ stasjon aar maaned dag time minutt regn ];
    opprettVar = [filnavn '(teller,:) = m;'];
    eval(opprettVar);
else
    teller = teller - 1 ;
end
end

%lagrer siste året
lagre = ['save('' filnavn '', '' filnavn '');'];
eval(lagre);
clear (filnavn); % fjerner variabelen fra minne

fclose(fid);

end

```


11.3 nedbor.m

```
function [timesregn maksregn maksregnindex detaljer] = nedbor (filnavn, intervall, preintervall, postintervall)
```

```
load(filnavn);
```

```
%intervall i sekunder
```

```
intervall = intervall * 60 + 1;
```

```
%forregn i sekunder
```

```
preintervall = preintervall * 60 + 1;
```

```
%forregn i sekunder
```

```
postintervall = postintervall * 60 + 1;
```

```
eval ([ 'x = ' filnavn ] );
```

```
% fjerner variabel med navn lik filnavn
```

```
clear(filnavn);
```

```
str = size (x,1)
```

```
teller = 0;
```

```
r = 0;
```

```
maalingteller = 0;
```

```
timesregn = zeros(1,7);
```

```
for (j = 1 : str )
```

```
    start = [ x(j, 2:6) 0 ];
```

```
    forrige_time = zeros(1,6);
```

```
    teller = teller + 1 ;
```

```
    r = 0;
```

```
    maalinger = [];
```

```
    maalingteller = 0;
```

```
    for (i = j : str )
```

```
        time = [ x(i, 2:6) 0 ];
```

```
        % summer data innenfor samme intervall
```

```
        diff = (datenum(time)-datenum(start)) * 86400;
```

```
        if (diff <= intervall || r == 0)
```

```
            maalingteller = maalingteller + 1;
```

```
            maalinger(maalingteller,:) = x(i,:);
```

```
            r = r + x(i,7);
```

```
        else
```

```
            timesregn(teller , :) = [forrige_time r] ;
```

```
            detaljer(teller).nedbor = r;
```

```
            detaljer(teller).maalinger = maalinger ;
```

```

% Addere et gitt intervall før og etter målingene av interesse, for
% å kunne få med for og etter regn på de korte kraftige hendelsene.

% Legger til forregn:
start = [ x(j, 2:6) 0 ]; % Startpunkt for "kjerneregnet" ----> " [Forregn][Kjerneregnet][Etterregn]
".

if (j > 2)
    forpunkt = j - 1; %Begynnelseslinje for "forregnet".
    pre = [ x(forpunkt, 2:6) 0 ]; % Begynnelsetidspunkt for "forregnet".

    prediff = (datenum(start) - datenum(pre)) * 86400; % Positiv differanse mellom
regnhendelse i "forregnet" og startpunkt for "kjerneregnet"

    while (prediff <= preintervall && forpunkt > 1) % Preintervall er lengden på forregnet i
sekunder.
        detaljer(teller).maalinger = [x(forpunkt,:); detaljer(teller).maalinger];
        forpunkt = forpunkt - 1; % Klargjøring for neste målelinje i "forregnet".
        pre = [ x(forpunkt, 2:6) 0 ]; %
        prediff = (datenum(start) - datenum(pre)) * 86400; %
    end

end

% Legger til etterregn:
slutt = [ x(i - 1, 2:6) 0 ]; % Sluttpunkt for "kjerneregnet" ----> "
[Forregn][Kjerneregnet][Etterregn] ".
etterpunkt = i; %Begynnelseslinje for "etterregnet".
post = [ x(etterpunkt, 2:6) 0 ]; % Begynnelsetidspunkt for "etterregnet".

postdiff = (datenum(post) - datenum(slutt)) * 86400; % Positiv differanse mellom
regnhendelse i "etterregnet" og sluttpunkt for "kjerneregnet"

while (postdiff <= postintervall && etterpunkt < str) % postintervall er lengden på etterregn i
sekunder.
    detaljer(teller).maalinger = [detaljer(teller).maalinger; x(etterpunkt,:)];
    etterpunkt = etterpunkt +1; % Klargjøring for neste målelinje i "etterregnet"
    post = [ x(etterpunkt, 2:6) 0 ]; %
    postdiff = (datenum(post) - datenum(slutt)) * 86400; %
end
break;
end
forrige_time = time;

end

end

```

```
detaljer = detaljer';
```

```
[verdi index] = max (timesregn(:,7))
```

```
%maksregn = fix(timesregn(index, :))
```

```
maksregn = timesregn(index, :);
```

```
maksregnindex = index ;
```

11.4 gisData.m

```
function gisData(detaljer, maksregnindex, utfil )

fid = fopen (utfil, 'w');

m = detaljer(maksregnindex).maalinger;
m = m(:, 2:end)

str = size(m,1)

header = ['Rainfall Intensity[mu-m/s]:Mean_Step_Accumulated \n' ...
         'Time\t"Regn"\n']

fprintf(fid , header)

for i=1 : str

dato = datestr([m(i, 1:5) 0 ] , 'yyyy-mm-dd HH:MM:SS' );
regn = num2str(m(i,6)*100/6);
linje = [ dato '\t' regn '\n'];

fprintf(fid , linje)

end

fclose(fid);
```

11.5 gisData2.m

```
function gisData2(detalj, maksregnindex, utfil )
%utfil = 'ut_long.txt'
fid = fopen (utfil, 'w');

m = detalj(maksregnindex).maalinger;
m = m(:, 2:end)

str = size(m,1)
diff = 0;

% Header!
header = ['Rainfall Intensity[ $\mu$ -m/s]:Mean_Step_Accumulated \n' ...
'Time\t"Regn"\n']
fprintf(fid , header)

for i=1 : str

    % tidspunkt for måling i
    naa = [m(i, 1:5)];

    dato = datestr([naa 0] , 'yyyy-mm-dd HH:MM:SS');
    dato = datenum(dato) - 60/86400;
    dato = datestr(dato , 'yyyy-mm-dd HH:MM:SS');

    if (i == 1 || diff > 60 )
        linje = [ dato '\t' '0 \n']
        fprintf(fid , linje)
    end

    % måledata, skrives uansett
    regn = num2str(m(i,6)*100/6)
    linje = [ dato '\t' regn '\n'];
    fprintf(fid , linje);

    % sjekker tidsteg til neste måling
    if (i ~= str)
        diff = etime([m(i+1,1:5) 0] , [ m(i,1:5) 0 ])
    else
        diff = 0;
    end

    if (diff == 60 )
        dato2 = datestr([m(i, 1:5) 0] , 'yyyy-mm-dd HH:MM:SS' );
        linje = [ dato2 '\t' regn '\n'];
    else
        dato2 = [naa 0];
        dato2 = datestr ( dato2 , 'yyyy-mm-dd HH:MM:SS' );
    end
end
```

```
    linje = [ dato2 '\t' regn '\n' ...  
            dato2 '\t' '0 \n'];  
end  
fprintf(fid , linje);  
  
end
```

```
fclose(fid);
```

11.6 gisData4.m

```
function gisData4(detaljer, maksregnindex, utfil )
%utfil = 'ut_long.txt'
fid = fopen (utfil, 'w');

m = detaljer(maksregnindex).maalinger;
m = m(:, 2:end)

str = size(m,1)
diff = 0;

% Header!
header = ['Rainfall Intensity[ $\mu$ -m/s]:Mean_Step_Accumulated \n' ...
         'Time\t"Regn"\n']
fprintf(fid , header)

for i=1 : str

    linje = "";

    % tidspunkt for måling i
    naa = [m(i, 1:5)];

    regn = m(i,6)*100/6
    regntekst = num2str(regn);

    %dato = datestr([m(i, 1:5) 0] , 'yyyy-mm-dd HH:MM:SS');
    dato = datestr([naa 0] , 'yyyy-mm-dd HH:MM:SS');

    %sluttid for regn
    datonaa = dato ;
    datonaa = datestr ( datonaa , 'yyyy-mm-dd HH:MM:SS' );

    %starttid for regn
    dato = datenum(dato) - 60/86400;
    dato = datestr ( dato , 'yyyy-mm-dd HH:MM:SS' );

    %første regnet
    if (i == 1)                                %if (i == 1 || diff > 60 )
        linje = [ dato '\t' '0 \n']
        linje = [linje dato '\t' regntekst '\n'];
        diff = 0;
    % sjekker tidsteg til neste måling
    elseif (i ~= 1)
        diff = etime([m(i,1:5) 0] , [ m(i-1,1:5) 0 ]);
    end

    if (diff == 60 && i ~= 1)
        linje = [linje dato '\t' regntekst '\n'];
    end
end
```

```

elseif (diff > 60)
    'test'
    dato = [m(i-1, 1:5) 0 ];
    dato = datestr (dato, 'yyyy-mm-dd HH:MM:SS' );
    regn = regn / (diff/60);
    regntekst = num2str(regn);
    linje = [linje dato '\t' regntekst '\n'];
else
    % GJØR INGENTING
    ;
end

% legger til siste linje med regn for dette minuttet
regntekst = num2str(regn);
linje = [ linje datonaa '\t' regntekst '\n' ] ;

if (i == str)
    linje = [ linje datonaa '\t' '0 \n'];
end
    %skriv til fil
fprintf(fid , linje);
end

fclose(fid);

```